



UADY

POSGRADO
INSTITUCIONAL
EN CIENCIAS
QUÍMICAS Y
BIOQUÍMICAS

EVALUACIÓN TÉCNICA Y AMBIENTAL DE LA PRODUCCIÓN
DE BIODIESEL EN MÉXICO

TESIS

PRESENTADA POR

KARLA DANIELA CHIKANI CABRERA

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRA EN CIENCIAS
QUÍMICAS Y BIOQUÍMICAS

MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO

2018



UADY

POSGRADO
INSTITUCIONAL
EN CIENCIAS
QUÍMICAS Y
BIOQUÍMICAS

**EVALUACIÓN TÉCNICA Y AMBIENTAL DE LA
PRODUCCIÓN DE BIODIESEL EN MÉXICO**

TESIS

PRESENTADA POR

I.Q.I. KARLA DANIELA CHIKANI CABRERA

EN OPCIÓN AL GRADO DE

**MAESTRA EN CIENCIAS
QUÍMICAS Y BIOQUÍMICAS**

MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO

2018



Mérida, Yuc., 5 de noviembre de 2018
Oficio Num.: PICQB/503/2018

Asunto: Autorización de digitalización

La tesis "Evaluación técnica y ambiental de la producción de biodiesel en México" presentada por la I.Q.I. Karla Daniela Chikani Cabrera, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar por el grado de Maestra en Ciencias Químicas y Bioquímicas, ha sido aprobada en cuanto a su contenido científico y en cuanto a lo establecido en el Manual de Procedimientos del Posgrado Institucional en Ciencias Químicas y Bioquímicas, por lo que se le autoriza la digitalización de los ejemplares correspondientes.

Director de la tesis

Dr. Julio C. Sacramento Rivero

Sinodales:

Firmas

Dr. Juan Enrique Ruíz Espinoza

Dr. Luis Fernando Morales Mendoza

Dr. Carlos Garcia Bustamante

ATENTAMENTE
"LUZ, CIENCIA Y VERDAD"

DRA. MAIRA RUBI SEGURA CAMPOS
COORDINADORA DEL POSGRADO INSTITUCIONAL
EN CIENCIAS QUÍMICAS Y BIOQUÍMICAS



POSGRADO INSTITUCIONAL
EN CIENCIAS QUÍMICAS
Y BIOQUÍMICAS

AGRADECIMIENTOS

A mi madre María del Carmen

A mis hermanas Tathiana y Marycarmen

A mi familia y amigos

A Dios

Por estar siempre a mi lado, apoyándome en todo momento sin importar las circunstancias. Ustedes son mi inspiración y mi soporte. Estoy inmensamente agradecida por todo lo que hacen por mí, el amor, la paciencia y ánimo que me han otorgado.

Este trabajo fue realizado en la Facultad de Ingeniería Química, de la Universidad Autónoma de Yucatán, bajo la dirección del Dr. Julio César Sacramento Rivero y formó parte del Proyecto: Centro Mexicano de Innovación en Energía (CEMIEBio) Clúster Biodiesel Avanzado (CONACYT 250014) con el apoyo de una beca concedida por CONACYT (CVU 787974).

RESUMEN

A pesar de existir proyecciones de la capacidad disponible de producción de biodiesel en México, se desconoce el impacto ambiental que esto tendría. Por esto, el presente trabajo analizó las rutas tecnológicas más relevantes para la producción de biodiesel a corto y mediano plazo de primera, segunda y tercera generación en México. Se generaron inventarios para el análisis de ciclo de vida (ACV) de la actualmente incipiente industria de biodiesel en el país. Actualmente, la ruta tecnológica existente en México es de segunda generación (a partir de aceite de cocina usado o ACU), y en el mundo no hay procesos industriales de tercera generación, por lo que analizar una ruta tecnológica de este tipo es en sí una actividad innovadora. Como resultado final, se comparó la capacidad de mitigación de las tres tecnologías con respecto al diésel, en tres categorías de impacto ambiental: calentamiento global, toxicidad humana y formación de smog. Estos estudios darán pautas para seleccionar mejores rutas tecnológicas a corto y mediano plazo.

El biodiesel a partir de aceite de palma, ACU y levaduras potencialmente mitigaría entre el 29-71% de las emisiones de GEI asociadas a las cantidades desplazadas de diésel fósil, dependiendo de la fuente. Sin embargo, en la categoría de formación de smog, el impacto es mayor para el biocombustible cuando se elabora de levaduras y de aceite de palma. Esta última fuente representa la mayor contribución a la producción total potencial de biodiesel. Antes de empezar a producir biodiesel de aceite de palma es necesario que el país satisfaga la demanda nacional de este aceite para otras industrias, lo cual se alcanzaría en dos años si la expansión del cultivo ocurre en pastizales a un ritmo de 75,432 ha anuales. El biodiesel obtenido a partir de la glicerina cruda utilizando levaduras oleaginosas aumentaría la producción de biodiesel en un 2%. Esta ruta es interesante de seguir investigando, pues tiene el potencial de utilizar como sustrato otras fuentes de carbono disponibles, como los residuos agroindustriales.

ABSTRACT

Despite available projections of the capacity of biodiesel production in Mexico, the environmental impact that this activity would have is unknown. Therefore, this work analyzed the most relevant pathways for the production of first, second and third generation biodiesel in the short and medium term in Mexico. Inventory analysis was generated for the life cycle assessment (LCA) of the currently incipient biodiesel industry in the country. The existing biodiesel production pathway in Mexico is second generation (from waste cooking oil, or WCO), so analyzing a third generation pathway is in itself an innovation. As the main result of this work, the mitigation potential in three environmental impact categories was reported: global warming potential, human toxicity and photochemical oxidation. These studies can support the analysis for selecting better pathways in the short and medium term.

Biodiesel from palm oil, WCO, and crude glycerin using yeasts have the potential for mitigating between 29-71% of GWP emissions of the corresponding fossil diesel. However, in the category of photochemical oxidation, the impact is greater for biodiesel when it is made from crude glycerin and palm oil. The latter source represents the largest contribution to the total potential production of biodiesel in Mexico. However, before starting to produce palm oil biodiesel it is necessary that the country satisfy the national demand of this oil for other industries. This could be achieved in two years if the expansion of the crop occurs in pastures at a rate of 75,432 hectares per year. The production of biodiesel from crude glycerin using oily yeasts would increase biodiesel production by 2%. This pathway is interesting for further investigations, since it has the potential to use other sources of carbon available in agroindustrial waste as a substrate.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	7
RESUMEN.....	11
ABSTRACT	13
INTRODUCCIÓN.....	1
ANTECEDENTES.....	3
Biocombustibles líquidos.....	4
Biocombustibles en México.....	5
Biodiesel	7
<i>Rutas tecnológicas del biodiesel</i>	8
<i>Primera generación</i>	8
Segunda generación	10
<i>Tercera generación</i>	11
Análisis de ciclo de vida (ACV)	13
<i>ACV del biodiesel</i>	20
Justificación	22
OBJETIVOS	23
Objetivo general.....	23
Objetivos particulares.....	23
MATERIALES Y MÉTODOS.....	24
Potencial de producción de biodiesel en el país.....	25
<i>Aceite disponible a partir de palma aceitera</i>	25
<i>Aceite disponible a partir de ACU</i>	26
<i>Aceite disponible a partir de glicerina cruda</i>	26
Análisis de Ciclo de Vida (ACV)	27
Análisis beneficio/costo.....	31

RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
Biomasa disponible para obtener biodiesel en México	35
<i>Materia prima disponible para obtener biodiesel a partir de palma de aceite</i>	35
<i>Materia prima disponible para obtener biodiesel a partir de ACU</i>	40
<i>Materia prima disponible para obtener biodiesel a partir de glicerina cruda y levaduras</i>	45
Descripción de las rutas tecnológicas	47
<i>Ruta tecnológica de primera generación (aceite de palma)</i>	47
<i>Ruta tecnológica de segunda generación (ACU)</i>	58
<i>Ruta tecnológica de tercera generación (levaduras)</i>	63
Resultados del análisis de ciclo de vida	71
<i>Análisis de ciclo de vida del biodiesel a partir de aceite de palma</i>	71
<i>Análisis de ciclo de vida del biodiesel a partir de ACU</i>	82
<i>Análisis de ciclo de vida del biodiesel a partir de glicerina cruda usando levaduras</i> .	86
Resultado del análisis beneficio/costo.....	91
Análisis beneficio/costo, biodiesel a partir de aceite de palma	91
Análisis beneficio/costo, biodiesel a partir de ACU	95
Análisis beneficio/costo, biodiesel a partir de glicerina cruda usando levaduras	98
Comparación de rutas tecnológicas	104
CONCLUSIONES	107
REFERENCIAS	109
ANEXOS.....	119
Anexo I. Directorio de empresas	119
Anexo II. Productividad del aceite de palma.....	125
Anexo III. Insumos de la etapa agrícola	128
Anexo IV. Balance de materia y energía, biodiesel a partir de aceite de palma	130
Anexo V. Cinéticas de reacción	135

Anexo VI. Combustión de la fibra (aceite de palma).....	138
Anexo VII. Balance de materia y energía de biodiesel de ACU	142
Anexo VIII. Balance de materia y energía de biodiesel de levaduras	146
Anexo IX. Módulos del SimaPro (aceite de palma)	151
Anexo X. Modelo de emisiones por uso de fertilizante	153
Anexo XI. Modelo de emisiones aguas residuales y tiraderos a cielo abierto.....	155
Anexo XII. Módulos del SimaPro (ACU).....	157
Anexo XIII. Módulos del SimaPro (levaduras).....	158

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Proyección del crecimiento anual de la demanda de diésel. Fuente: (SENER, 2016)	5
Figura 2 Diagrama de bloques para la producción de biodiesel a partir de aceite de palma	9
Figura 3 Diagrama de bloques para la producción de biodiesel a partir de ACU.....	11
Figura 4 Diagrama de bloques para producir biodiesel a partir de levaduras	13
Figura 5 Etapas del análisis de ciclo de vida de un producto o actividad	14
Figura 6 Etapas del ciclo de vida de un producto de la cuna a la tumba	15
Figura 7 Diagrama de bloques de la metodología a utilizar	24
Figura 8 Superficie disponible en hectáreas en México para plantaciones de palma aceitera	36
Figura 9 Demanda histórica y proyectada del consumo nacional de aceite de palma.....	37
Figura 10. Superficie disponible para plantaciones de palma aceitera para biodiesel y alimento.....	38
Figura 11 Crecimiento proyectado de superficie para plantaciones de palma aceitera para biodiesel por estado.....	39
Figura 12 Mapa de las zonas metropolitanas de México (INEGI, 2010)	41
Figura 13 Empresas productoras de biodiesel a partir de ACU.....	44
Figura 14 Empresas productoras de biodiesel a partir de ACU (centro del país)	45
Figura 15 Límites del sistema para la producción de biodiesel a partir de aceite de palma	49
Figura 16 Diagrama de flujo de proceso para la extracción de aceite de palma.....	50
Figura 17 Diagrama de flujo de proceso para la producción de biodiesel a partir de palma de aceite.....	54
Figura 18 Límites del sistema para la producción de biodiesel a partir de ACU	58
Figura 19 Diagrama de flujo de proceso para la producción de biodiesel a partir del aceite residual de cocina.....	59
Figura 20 Límites del sistema para la producción de biodiesel a partir de levaduras	64
Figura 21 Diagrama de flujo de proceso para la producción de biodiesel a partir de levaduras	66
Figura 22 Distribución y valores totales de los impactos ambientales potenciales en las categorías GWP, HTP y POCP, referidos a 1 MJ de biodiesel.....	77

Figura 23 Otros impactos ambientales potenciales del biodiesel de ACU	78
Figura 24. Distribución de los impactos ambientales potenciales en las etapas del sistema de bioenergía en el escenario estudiado (aceite de palma)	80
Figura 25. Distribución de los impactos ambientales potenciales en las etapas del sistema de bioenergía en el escenario estudiado (ACU).....	84
Figura 26. Distribución y valores totales de los impactos ambientales potenciales en las categorías GWP, HTP y POCP (ACU).....	87
Figura 27. Distribución de los impactos ambientales potenciales en las etapas del sistema de bioenergía en el escenario estudiado (levaduras).....	88
Figura 28. Distribución de los impactos ambientales potenciales en las etapas del sistema de bioenergía en el escenario estudiado (levaduras).....	90
Figura 29 Distribución del CVP en la producción de biodiesel a partir de palma de aceite	93
Figura 30 Distribución del CVP en la producción de biodiesel a partir de ACU	96
Figura 31 Costo variable de producción de biodiesel a partir de levaduras.....	101
Figura 32 Análisis de la relación B/C con respecto a los rendimientos de la biomasa....	103
Figura 33 Comparación de mitigación de las rutas tecnológicas.....	104
Figura 34 Proceso de combustión a partir de cáscaras y racimos de fruta frescas de palma	139

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Demanda e importaciones de diésel (en miles de barriles diarios, mbd)	5
Tabla 2 Producción mundial de biodiesel (principales productores)	7
Tabla 3 Principales categorías del impacto ambiental.....	17
Tabla 4 Metodologías de evaluación de impacto ambiental para el ACV.	18
Tabla 5 Productos del sistema alternativo y relaciones de sustitución para cada producto	29
Tabla 6 Calculo del costo total de producción	32
Tabla 7 Cálculo del capital fijo de inversión	33
Tabla 8 Producción de biodiesel de aceite de palma proyectada (metros cúbicos)	39
Tabla 9 ACU recuperado en miles de m ³ anuales.....	42
Tabla 10 Estimación de ACU recolectado (en m ³ anuales) en las 15 zonas metropolitanas con mayor producción en México, para el periodo 2016-2040.	42
Tabla 11 Kilómetros abarcados por zonas metropolitanas y capacidad de producción	43
Tabla 12 Glicerina cruda disponible como sustrato	45
Tabla 13 Descripción de los equipos de proceso en la extracción de aceite de palma.....	50
Tabla 14 Consideraciones adicionales utilizadas en el Simulador para la extracción del aceite de palma	52
Tabla 15 Perfil de ácidos grasos de aceite de palma	53
Tabla 16 Composición de aceite de palma	53
Tabla 17 Descripción de los equipos de proceso en la producción de biodiesel a partir de aceite de palma	55
Tabla 18 Porcentaje de retención de las resinas poliméricas.....	56
Tabla 19 Especificaciones de diseño para la simulación de la producción de biodiesel a partir de aceite de palma	56
Tabla 20 Descripción de los equipos de procesos de la producción de biodiesel a partir de ACU.....	60
Tabla 21 Perfil de ácidos grasos de ACU.....	60
Tabla 22 Composiciones en porcentaje peso del ACU	61
Tabla 23. Especificaciones de diseño para la simulación de la producción de biodiesel a partir de ACU	61
Tabla 24 Datos para la incubación de levaduras.....	64
Tabla 25 Datos de la <i>Yarrowia lipolytica</i>	65

Tabla 26 Descripción de los equipos de procesos de la producción de biodiesel a partir de levaduras	67
Tabla 27 Composición del perfil de ácidos grasos libres obtenidos a partir de levaduras	68
Tabla 28 Composición en fracción peso del aceite obtenido a partir de las levaduras	68
Tabla 29 Especificaciones de diseño para la simulación de la producción de biodiesel a partir de levaduras	69
Tabla 30 Resumen de los productos e índices de eficiencia de la producción de biodiesel a partir de aceite de palma	71
Tabla 31 Inventario de ciclo de vida para la producción de biodiesel a partir de aceite de palma por MJ de biodiesel al año (Etapa agrícola)	72
Tabla 32. Emisiones derivadas de la etapa agronómica por concepto de uso de fertilizantes y cambio de uso del suelo. Cantidades referidas a 1 MJ de biodiesel producido.	73
Tabla 33. Emisiones derivadas por el uso de pesticidas	74
Tabla 34 Emisiones estimadas para la etapa de gestión de residuos	74
Tabla 35. Emisiones durante la combustión de biomasa para generar vapor de alta presión	75
Tabla 36 Emisiones derivadas de la combustión de la biomasa para obtener energía eléctrica	75
Tabla 37 Potencial de mitigación ambiental de la producción de biodiesel (aceite de palma).	79
Tabla 38 Factores de emisión por atribución energética, referidos a 1 MJ de biodiesel y porcentajes de mitigación (aceite de palma)	79
Tabla 39. Consumo de agua en la producción de biodiesel a partir de aceite de palma. .	80
Tabla 40. Indicadores energéticos del sistema de bioenergía en los escenarios estudiados.	81
Tabla 41 Resumen de los productos e índices de eficiencia de la producción de biodiesel a partir de ACU	82
Tabla 42 Inventario de ciclo de vida para la producción de biodiesel a partir de ACU por MJ de biodiesel al año	82
Tabla 43 Factores de emisión por atribución energética, referidos a 1 MJ de biodiesel y porcentajes de mitigación (ACU)	83
Tabla 44. Factores de impacto calculados por expansión del sistema por ampliación, referidos por MJ de energético.	84
Tabla 45. Consumo de agua en el ciclo de vida del biodiesel de ACU.	85

Tabla 46. Indicadores energéticos del sistema de bioenergía en los escenarios estudiados. Cifras referidas a 1 MJ de biodiesel (ACU).	85
Tabla 47 Resumen de los productos e índices de eficiencia de la producción de biodiesel a partir de levaduras	86
Tabla 48 Inventario de ciclo de vida para la producción de biodiesel a partir de levaduras por MJ de biodiesel al año	86
Tabla 49 Factores de emisión por expansión del sistema por ampliación (levaduras)	89
Tabla 50 Factores de emisión por atribución energética, referidos a 1 MJ de biodiesel y porcentajes de mitigación (levaduras).....	89
Tabla 51. Consumo de agua en el ciclo de vida del biodiesel de ACU.....	90
Tabla 52. Indicadores energéticos del sistema de bioenergía en los escenarios estudiados. Cifras referidas a 1 MJ de biodiesel (levaduras).	91
Tabla 53 Beneficios obtenidos por las ventas	91
Tabla 54 Costo total de producción.....	92
Tabla 55 Análisis económico de la producción de biodiesel a partir de palma de aceite ..	93
Tabla 56 Costo total de la inversión de la producción de biodiesel a partir de aceite de palma	94
Tabla 57 Beneficios obtenidos por las ventas de biodiesel a partir de ACU	95
Tabla 58 Costo total de producción de biodiesel a partir de ACU	95
Tabla 59 Análisis económico de la producción de biodiesel a partir de ACU	97
Tabla 60 Costo total de la inversión de la producción de biodiesel a partir de ACU	97
Tabla 61 Beneficios obtenidos por las ventas (biodiesel a partir de levaduras).....	99
Tabla 62 Beneficios obtenidos por las ventas de biodiesel a partir de aceite de palma y ACU, reutilizando la glicerina	99
Tabla 63 Costo total de producción.....	99
Tabla 64 CTP en sistemas combinados en la producción de biodiesel	100
Tabla 65 Costo total de la inversión de la producción de biodiesel a partir de levaduras	101
Tabla 66 Análisis económico de la producción de biodiesel a partir de ACU	102
Tabla 68 Potencial de mitigación de otras categorías de impacto	105
Tabla 69 Actividades con mayor impacto en cada ruta tecnológica estudiada	105
Tabla 69 Directorio de empresas en el país de biodiesel	119
Tabla 70 Producción por hectárea de racimos de fruta fresca	125
Tabla 72 Productividad t/ha en algunas localidades de Tabasco	125
Tabla 72 Paquete tecnológico para palma de aceite (Sagarpa-Inifap)	128

Tabla 73 Paquete tecnológico para palma de aceite (CONAGUA).....	128
Tabla 74 Datos de palma de aceite en la etapa agrícola (Tabasco).....	129
Tabla 75 Balance de materia y energía a partir de aceite de palma obtenido del simulador Aspen Plus	130
Tabla 76 Parámetros de las cinéticas de reacción para la esterificación ácida de ACU .	135
Tabla 77 Parámetros de las cinéticas de reacción para la transesterificación	135
Tabla 78 Análisis proximal de la torta de extracción (Husain, Zainac, & Abdullah, 2002)	138
Tabla 79 Análisis ultanal de la torta de extracción (Husain et al., 2002).....	138
Tabla 80 Equipos utilizados en el diagrama de proceso para la combustión de cáscaras y racimos de fruta fresca	140
Tabla 81 Consideraciones utilizadas en el simulador Aspen Plus para el proceso de combustión	141
Tabla 82 Balance de materia y energía a partir de ACU obtenido del simulador Aspen Plus	142
Tabla 83 Balance de materia y energía a partir de levaduras obtenido del simulador Aspen Plus	146
Tabla 84 Módulos utilizados en el SimaPro 8.4 para biodiesel a partir de aceite de palma	151
Tabla 85. Contenido de metales pesados de ciertos fertilizantes minerales.....	153
Tabla 86. Precipitación media por estado (INEGI)	154
Tabla 87. Otras emisiones generadas por la aplicación de fertilizantes por 1 MJ de biodiesel.	154
Tabla 88. Caracterización de los residuos obtenidos. Cantidades en kilogramos por tonelada de racimo de fruta fresca (Stichnothe & Schuchardt, 2010).....	155
Tabla 89 Resultados obtenidos de biodiesel, residuos sólidos y aguas residuales a partir de palma.....	156
Tabla 90. Emisiones al agua y al suelo en vertederos abiertos de racimos de fruta vacíos y torta de extracción residual	156
Tabla 91 Módulos utilizados en el SimaPro 8.4 para biodiesel a partir de ACU	157
Tabla 92 Módulos utilizados en el SimaPro 8.4 para biodiesel a partir de levaduras	158

INTRODUCCIÓN

La energía es fundamental para el desarrollo de la sociedad, sin embargo, la gran cantidad de energía utilizada en todo el mundo proviene principalmente de combustibles fósiles. Su explotación ha traído consecuencias devastadoras, una de ellas es el calentamiento global, ocasionado por las emisiones nocivas de gases de efecto invernadero (GEI) (Bauer, Grotz, Connelly, & Colosi, 2016). Durante el 2015 el 31% de la demanda de energía provenía del petróleo, 28.1% de carbón y el 21.6% de gas natural, cabe mencionar que el 34.6% de las emisiones GEI a nivel mundial son ocasionadas por la combustión de combustibles derivados del petróleo (IEA, 2017b) y el 24% de las emisiones de dióxido de carbono a nivel mundial son originadas por el sector transporte (IEA, 2017a).

La creciente demanda de energía y el calentamiento global son problemas prioritarios para todo el planeta, por lo que buscar nuevas fuentes alternas de energía es una tarea importante. Durante el 2015 se adoptó el primer acuerdo climático para extender la obligación de mitigación a todos los países y México no es una excepción (IEA, 2017a). En el país durante el 2015 se emitieron 638 millones de toneladas equivalente de dióxido de carbono (MtCO₂e), del total de las emisiones el 25.1% (171 MtCO₂e) de las emisiones corresponden al sector transporte (INECC, 2018).

Por otra parte, la Secretaría de Energía informó que en el periodo 2010-2015, la demanda de diésel incremento 1.5%. En el 2015 la demanda interna del diésel fue de 384.7 miles de barriles diarios (mbd) mientras que las importaciones fueron de 145.3 mbd. De la demanda interna del diésel, el 87% es por el sector de transporte. Se estima que del 2016 al 2030 la tasa media de crecimiento anual será de un 3.6% (SENER, 2016). Durante la COP-21 de 2015 (celebrada en París), México se comprometió a reducir el 22% de emisiones de gases de efecto invernadero hacia el año 2030 (SEMARNAT, 2015). Debido al cambio climático, la gran dependencia del combustible fósil y la seguridad energética del país, México ha optado por incluir a las energías renovables como medio para satisfacer las demandas energéticas descritas anteriormente. Una de ellas es el biodiesel. Éste es un biocombustible líquido sustituto al diésel, obtenido a partir de materia prima renovable, que puede clasificarse como biocombustible de primera generación (se obtienen a partir de granos destinados para alimentos), segunda generación (utilizan residuos agrícolas lignocelulósicos y semillas oleaginosas que no compitan con alimentos) y tercera generación (provenientes de microorganismos, como micro-algas o levaduras) (Speight & Radovanovic, 2015).

Sin embargo, recientes estudios realizados en otros países han demostrado que el uso de biocombustibles ha traído desafíos tanto económicos como ambientales. Entre ellos están la reducción de la biodiversidad, los impactos de uso de la tierra y el consumo de agua, entre otros (Iriarte, Rieradevall, & Gabarrell, 2012). Para medir el impacto ambiental se puede usar una herramienta, el Análisis del ciclo de vida (ACV). Se trata de

una metodología para estimar los impactos ambientales potenciales asociados a un producto en particular o alguna actividad (Fullana, 2009). El uso de esta herramienta en sistemas de bioenergía ha complicado las comparaciones de los estudios realizados, esto se debe a los diferentes tipos de entradas, unidades funcionales, métodos de asignación, sistemas de referencia y otras suposiciones, dando a lugar a amplios rangos de resultados finales. El uso de materia prima renovable o biomasa para crear productos que ayuden a disminuir el impacto ambiental, principalmente de la categoría de impacto de calentamiento global, pueden presentar problemas de sostenibilidad incluso afectar otras categorías de impacto de interés (Cherubini & Strømman, 2011), por lo que desarrollar un adecuado manejo del uso del ACV en sistemas de bioenergía, permitirá determinar si la elaboración de productos de interés como el biodiesel prometen contribuir al cuidado del medio ambiente.

En México existen varias oportunidades para producir biodiesel, debido a la gran biodiversidad agrícola, las condiciones climáticas y geográficas idóneas para este propósito (SEMARNAT, 2015). Actualmente, el país cuenta con algunas empresas establecidas para la producción de biodiesel, sin embargo, el mercado de biodiesel en el país está en crecimiento, lo que hace difícil evaluar los impactos ambientales. Se desconoce qué oportunidad tiene el país con respecto a las metas para reducir los GEI al usar biodiesel como sustituto a diésel. Por lo anterior el presente trabajo analizó las rutas tecnológicas más relevantes y las más prometedoras en México para la producción de biodiesel a corto y mediano plazo de primera, segunda y tercera generación en México, obteniendo proyecciones de la capacidad de producción de biodiesel en México y el posible establecimiento de empresas del periodo comprendido del 2016 al 2040, de igual manera se desconoce el impacto ambiental que esto tendría, por lo que se generaron inventarios para el ACV de la industria incipiente de biodiesel en el país para realizar la evaluación ambiental, así como técnica y económica de cada ruta tecnológica. Se determinó la capacidad que tendría el país al establecer empresas productoras de biodiesel del periodo comprendido del 2016 al 2040 para satisfacer la creciente demanda de diésel.

Actualmente, la ruta tecnológica existente en México es de segunda generación (a partir de aceite de cocina usado o ACU), por lo que elaborar una ruta tecnológica de tercera generación es en sí una actividad innovadora. Como resultado final, se comparó la capacidad de mitigación de las tres tecnologías con respecto al diésel, en diez categorías de impacto ambiental, siendo tres las de mayor interés: calentamiento global, toxicidad humana y formación de smog. De igual manera se realizó un análisis beneficio/costo. Estos estudios darán pautas para seleccionar mejores rutas tecnológicas a corto y mediano plazo.

ANTECEDENTES

La preservación y administración de nuestros recursos fósiles, ha sido un tema relevante durante el siglo XXI, puesto que su explotación y utilización como fuente de energía ha traído consecuencias en el deterioro gradual del medio ambiente. Por esto se han establecido políticas en todo el mundo para crear una economía que sea sostenible, con el propósito de disminuir la utilización de los recursos fósiles, la disminución de los gases de efecto invernadero y el cambio climático, tomando como pilar los productos de base biológica, bioenergía y biocombustibles (Kamm, Gruber, & Kamm, 2006).

Los biocombustibles se definen como combustibles líquidos o gases producidos a partir de biomasa obtenida de la agricultura y productos forestales, así como desechos municipales, entre otros (Delucchi, 2010). Los biocombustibles ayudan a la economía en países que no cuentan con combustibles fósiles. Además, la producción de biocombustible disminuye la dependencia que existe hacia los recursos fósiles (Dufey, 2006).

Una gran ventaja de los biocombustibles líquidos es que las emisiones de dióxido de carbono son menores con respecto a los combustibles fósiles (durante todo el ciclo productivo). Esto se debe a que, en el ciclo de vida, cuando las plantas realizan el proceso de fotosíntesis absorben dióxido de carbono de la atmósfera para transformarla a carbohidratos y otras moléculas orgánicas. Cuando la biomasa es utilizada como biocombustible, se libera dióxido de carbono, por lo que no incrementan la concentración del carbono atmosférico, prácticamente el dióxido de carbono no se reduce, pero sí sigue un ciclo, el dióxido de carbono expulsado por los vehículos será el mismo que utilicen las plantas, y a partir de residuos provenientes de ellas se produce biocombustibles (Delucchi, 2010). A esto se le conoce como el principio de neutralidad de carbono de la bioenergía.

A pesar de sus beneficios, la opción de los biocombustibles solo resuelve una pequeña parte del problema para obtener energía sin usar recursos fósiles, puesto que hay ciertos desafíos que limitan su producción. En el caso de los biocombustibles de primera generación, una limitante es la competencia con respecto al uso de tierra que está destinada primordialmente para cultivos de alimentos y la forestación. Los cultivos energéticos conllevan otro problema: la contaminación y la disponibilidad del agua. Sin embargo, estos resultados varían de acuerdo con las materias primas a utilizar, el tratamiento que se le dé al suelo, la región geográfica, así como las rutas tecnológicas para obtenerlos (Iriarte et al., 2012).

Actualmente se están llevando a cabo estudios para mejorar las tecnologías de la producción de biocombustibles para que sean sostenibles y económicamente viable. Una tendencia es suplantarse a los combustibles de primera generación (aquellos que se obtienen a partir de granos destinados para alimentos) por los de segunda generación (utilización de residuos agrícolas lignocelulósicos, generación de industrias especializadas en semillas oleaginosas que no compitan con alimentos) (Speight & Radovanovic, 2015). Otra tendencia de investigación es desarrollar tecnología para hacer más viable la producción

simultánea de alimentos y biocombustible con cultivos de primera generación. Estos cultivos son llamados flexibles (*flex crops*) y éste enfoque se acerca más a la definición de biorrefinería.

Biocombustibles líquidos

El 78.4% de la energía utilizada mundialmente corresponde al uso de combustible fósiles, el 2.6% corresponde a energía nuclear y el 19% de energía proviene de fuentes renovables. Dentro de las fuentes renovables, el 9% está representado por el uso tradicional de biomasa (leña y carbón vegetal), y el 10% por fuentes modernas de energía renovables, de las cuales el 3.8% es la energía hidroeléctrica, el 5.4% es energía obtenida a partir de biomasa, energía geotérmica, energía solar y energía eólica, mientras que solo el 0.8% corresponde al uso de biocombustibles destinados al sector de transporte (REN21, 2016).

El 90% de la producción de biocombustibles líquidos corresponden a biodiesel y bioetanol para el sector de transporte (Dufey 2006). Durante el 2015, a nivel mundial se produjeron 87.2 miles de millones de litros de bioetanol y 26.3 millones de litros de biodiesel (REN21, 2016).

El biodiesel y el bioetanol son utilizados como sustituto o como mezcla para el diésel y la gasolina, respectivamente. Ambos pueden ser utilizados directamente en los motores. El biodiesel se utiliza en motores diésel, mientras que el bioetanol se utiliza en motores a gasolina. De igual manera se pueden hacer mezclas; en el caso del biodiesel es común hacer mezclas del 5% con diésel, conocida con el nombre de B5 (Dufey, 2006). En cuanto al bioetanol, la mezcla más popular entre los vehículos ligeros es el E85, que contiene 85% de bioetanol y 15% de gasolina (Balat, Balat, & Öz, 2008).

El 13.2% de las emisiones de CO₂ provienen del sector de transporte, del cual solo un 3% representa a la industria de la aviación. A pesar de que la aviación contribuye a un porcentaje bajo con respecto a las emisiones, tiene otro tipo de impactos ambientales, puesto que las emisiones se inyectan a una gran altitud, entre los 8 y los 12 km, en las que liberan óxidos de nitrógeno que contribuyen a la formación de ozono, así como partículas de hollín y vapor de agua (Ramos, Gomes, & Barbosa-Póvoa, 2012). La turbosina es el combustible utilizado en los aviones, se obtiene a partir del petróleo. Globalmente se estima que se consumen aproximadamente 312 millones de m³ de turbosina al año. La industria de la aviación tiene metas para reducir sus emisiones de dióxido de carbono, puesto que anualmente produce 700 toneladas de CO₂, por lo que se han estado haciendo investigaciones para crear biocombustibles que pueda ser utilizado por los motores de los aviones (Cortez et al., 2015). Una de las metas a corto plazo se planea reducir un 10% hacia el 2020 (Sepúlveda González, 2012).

Biocombustibles en México

Durante el 2010 se requirieron 8,152 PJ de energía para satisfacer los requerimientos energéticos en el país, de las cuales el 91.5% fue aportado por los combustibles fósiles (García, Riegelhaupt, & Maserá, 2013). Un estudio realizado por la Secretaría de Energía (SENER) informó que durante cinco años la demanda de diésel incremento 1.5% como se observa en la Tabla 1 (SENER, 2016).

Tabla 1 Demanda e importaciones de diésel (en miles de barriles diarios, mbd)

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Demanda interna de diésel	371.1	383.6	400.5	391.7	389.4	384.7
Importaciones de diésel	108	135.7	133.6	107.1	132.9	145.3

Fuente: (SENER, 2016)

Dentro de la demanda interna del diésel, el 87% es en el sector de transporte. Este estudio determinó que en el año 2030 el país requerirá 587.1 mbd. De igual manera, del 2016 al 2030 la tasa media de crecimiento anual será de un 3.6% como se observa en la Figura 1 (SENER, 2016).

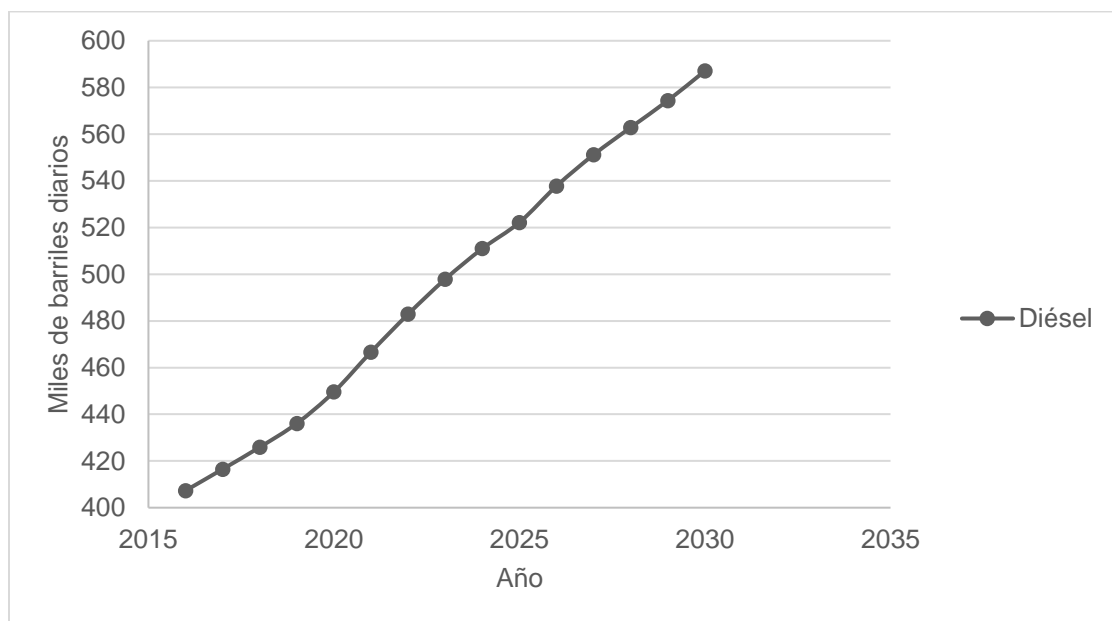


Figura 1 **Proyección del crecimiento anual de la demanda de diésel.** Fuente: (SENER, 2016)

Por otro lado, el país se ha visto perjudicado por el cambio climático. Las características geográficas de México y las condiciones sociales desfavorables de muchos de sus habitantes lo hacen un país vulnerable a los efectos del cambio climático. Durante

los últimos años se han observado cambios en la temperatura superficial terrestre del territorio mexicano, que traen como consecuencias fenómenos hidrometeorológicos extremos, como ciclones tropicales y huracanes (GobMex, 2014). Durante el 2011, el 90% del territorio mexicano se vio afectado por sequías. De igual manera el nivel del mar se ha elevado en muchas zonas costeras. Otro fenómeno que se ha observado es el incremento de días cálidos y gélidos extremos. Por lo que el gobierno mexicano adoptó compromisos de mitigación y adaptación ante el cambio climático (GobMex, 2014).

En un estudio realizado durante el 2010 a nivel mundial, México ocupó la posición número 12 con respecto a los países que producen más emisiones de CO₂, aportando un total de 417 MtCO₂e, de los cuales el sector transporte emite 186 Mt/a de CO₂. Así, el gobierno mexicano se ha interesado en la producción de biocombustibles líquidos como el bioetanol y el biodiesel (SEMARNAT, 2015).

Por lo descrito anteriormente, el país se suscribió durante la COP-21 en 2015 a un acuerdo celebrado en París, cuyo fin es la reducción de gases de efecto invernadero. Así, se fijó el objetivo de reducir 22% de emisiones de gases de efecto invernadero y un 51% de carbono negro hacia el año 2030. De igual manera, el país adoptó el compromiso de generar un 35% de energía limpia en el 2024 y 43% al 2030 (SEMARNAT, 2015).

En México, los cultivos identificados para la producción de biodiesel en el país son la jatrofa, higuierilla y palma de aceite (SAGARPA, 2012). La producción de biodiesel a partir de jatrofa e higuierilla es técnicamente viable, aunque no se tiene tanta experiencia a nivel internacional. Sin embargo, el costo para obtener biodiesel es mayor que el costo al obtener el diésel comercializado por PEMEX. Con respecto a la materia prima a partir de cultivos agrícolas, estos representan entre el 59% y 91% de los costos de producción de biodiesel, por lo que la utilización de materias primas de bajo costo como aceites y grasas recicladas es una opción más viable por el momento (SENER, 2006).

El país tiene un potencial de producción anual de 9,315 millones de litros de biodiesel, teniendo disponible un total de 6,822,090 ha para siembra de jatrofa, higuierilla y palma de aceite (SAGARPA, 2013). Sin embargo, en el caso de jatrofa e higuierilla es una opción emergente a largo plazo. En el caso de la palma de aceite se desconoce qué porcentaje de lo disponible en el país se utilizará para obtener biodiesel sin afectar el consumo nacional de aceite de palma y aceite de palmiste.

Actualmente hay empresas establecidas en el país produciendo biocombustibles, principalmente biodiésel. Sin embargo, el mercado de la producción de biocombustibles es incierto y se desconoce qué porcentaje aportan las empresas establecidas con respecto a las metas que tiene el país de reducir los gases de efecto invernadero y el CO₂. Así, es primordial realizar un levantamiento de datos que permita evaluar los impactos ambientales que tiene la producción de biodiesel en el país.

Biodiesel

El biodiesel se define como la mezcla de ésteres que se obtiene cuando se realiza la reacción de transesterificación, donde el metanol o etanol (metil-ésteres y etil-ésteres, respectivamente) reacciona con los triglicéridos proveniente de aceites vegetales, residuos de aceite de cocina o grasas de animales, en presencia de un catalizador (Van Gerpen, 2005).

Algunas ventajas del biodiesel son: es biodegradable, casi no emite CO por la buena combustión que tiene, debida a la presencia de oxígeno en la cadena del éster; no hay componentes sulfurados (Marchetti, 2010) y principalmente, logra una alta reducción de emisiones de CO₂ (de un 45 a 74%) con respecto al diésel obtenido de combustibles fósiles. Además, la materia prima mayoritaria es renovable y el uso de combustible fósil es mucho menor que en el proceso de producción del diésel. Para crear una unidad de diésel es necesario utilizar 1.2 unidades de recursos fósiles, en el caso del biodiesel únicamente se requieren 0.31 unidades de recursos fósiles (Sheehan et al., 2000).

Por otro lado, existen desventajas con respecto a los filtros del motor, que requieren cambio y limpieza frecuente; incremento en las emisiones de NOx durante la combustión, debido a la gran cantidad de oxígeno de la molécula y no puede almacenarse por más de seis meses, por lo que se requiere un aditivo antioxidante para poder ser almacenado durante más tiempo (Marchetti, 2010). Es por esto que para su comercialización se prefieren mezclas de biodiesel con diésel fósil, de entre 5% a 20% en volumen de biodiesel y el resto de diésel fósil (B5 y B20, respectivamente).

Durante el 2015, a nivel mundial la producción de biodiesel fue de 26.3 millones de litros (REN21, 2016), durante este año los principales productores de biodiesel fueron la Unión Europea y Estados Unidos, principalmente con tecnología de primera generación, como se observa en la Tabla 2 (Castro, 2015).

Tabla 2 Producción mundial de biodiesel (principales productores)

Región	Millones de toneladas de biodiesel al año	Fuente principal de aceite
Unión Europea	10,800	Colza
Estados Unidos	3,600	Soya
Brasil	3,600	Soya
Argentina	1,800	Soya
Tailandia	1,550	Palma de aceite

Rutas tecnológicas del biodiesel

El proceso para obtener biodiesel depende de la materia prima a utilizar. Se pueden identificar rutas tecnológicas de primera, segunda y tercera generación, las cuales se describen a continuación.

Primera generación

Las materias primas que se usan para obtener biodiesel de primera generación son semillas oleaginosas: semillas de colza, aceite de palma, semillas de girasol y soya (Stöcker, 2008). El principal problema de utilizar biocombustibles de primera generación es la competencia con los cultivos destinados a la alimentación, el uso de la tierra y el impacto con la biodiversidad (Naik, Goud, Rout, & Dalai, 2010).

Para obtener el aceite se utilizan separaciones mecánicas (descortezado de la materia prima, molienda, extracción por prensado, etc.) o solventes como el hexano. Como ejemplo, se explicará el proceso para obtener biodiesel a partir de la palma de aceite. La producción inicia en el campo, desde la preparación del terreno, hasta el cultivo y la cosecha. La palma de aceite inicia su producción el segundo o tercer año después de la siembra. Durante la cosecha se obtiene racimos de fruta fresca que se calientan y enseguida los frutos se separan de los racimos por medio de un proceso mecánico donde se obtienen residuos (CUE, 2012).

A la nuez obtenida se le extrae el aceite por medio de extracción mecánica. Obteniendo como residuo aceite y una torta residual. La torta residual puede utilizarse para obtener vapor en calderas (CUE, 2012).

El aceite obtenido a partir del proceso de extracción mecánica y la extracción por solventes, es filtrado y clarificado para obtener un aceite puro. El aceite se clarifica a través de una separación gravimétrica, la cual se base en la diferencia de densidades. Enseguida el aceite se seca para reducir la humedad. Durante el proceso de clarificado se obtiene agua contaminada con aceite como subproducto. El agua contaminada contiene residuos de aceite, para recuperar el aceite se pasa por una centrifuga. El agua contaminada tiene que ser sometida a un tratamiento de efluentes (CUE, 2012).

Una vez obtenido el aceite puro, se puede llevar a cabo una esterificación acida siempre y cuando el aceite tenga una concentración superior a un 3% de ácidos grasos libres (AGL) (Demirbas, 2009; Zhu, Zong, & Wu, 2008). En esta reacción, el alcohol reacciona con los AGL en presencia de un catalizador, el ácido sulfúrico, produciendo ésteres (biodiesel) y agua. Si se utiliza transesterificación alcalina directamente, una concentración alta de ácidos grasos libres en el aceite produce una reacción secundaria, cuyos productos son jabones (Van Gerpen, 2005).

Cuando no es necesario llevar a cabo la esterificación, se realiza la reacción de transesterificación directamente. Los remanentes de la reacción de transesterificación son: el glicerol (co-producto) y materia prima que no reaccionó en forma de monoglicérol, diglicérol, triglicéridos y AGL (Angelovič, Tkáč, & Jablonický, 2014). Estos productos secundarios se obtienen, debido a que la reacción de transesterificación se da en tres etapas reversibles y en cada etapa se obtiene biodiesel, donde los diglicéridos y monoglicéridos son intermediarios que se producen y se consumen durante la reacción, sin embargo, quedan remanentes una vez finalizada la reacción. En cuanto al catalizador de la transesterificación, puede ser básico (como el hidróxido de potasio o el hidróxido de sodio) (Koh & Ghazi, 2011), o ácidos; adicionalmente pueden usarse enzimas y catalizadores heterogéneos, como resinas sólidas, óxido de calcio u óxido de aluminio (Marchetti, 2010). En la Figura 2 se muestra el proceso de producción de biodiesel a partir de la palma de aceite.

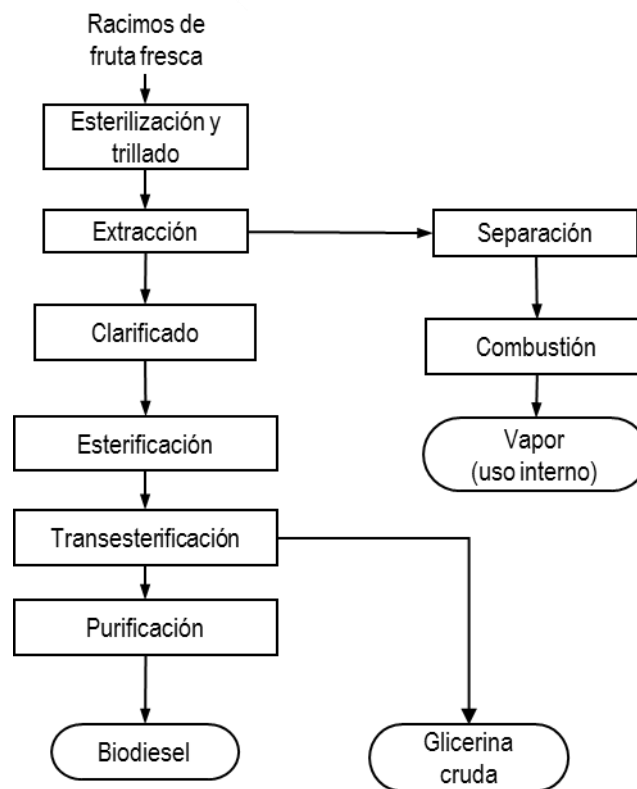


Figura 2 Diagrama de bloques para la producción de biodiesel a partir de aceite de palma

En los procesos industriales para obtener biodiesel se utiliza normalmente catalizadores básicos (hidróxido de sodio o potasio) (Marchetti, 2010). Una vez llevada a cabo la reacción de transesterificación se remueven los productos secundarios, por lo que se utiliza un proceso de purificación para cumplir con las normas de calidad, una de ellas

es la de la American Society for Testing and Materials (ASTM D7467 para mezclas diésel que contienen entre un 6 a 20% de biodiesel) y en la Comunidad Europea, el European Standard EN 14214. Tradicionalmente se usa una absorción (lavado) con agua para el proceso de purificación, pero recientemente se usan resinas iónicas para retirar residuos de metanol y catalizador, seguido de una destilación del biodiesel para obtener el producto final. En algunos casos, se neutraliza el catalizador remanente en el glicerol, seguido de evaporación o una destilación, para purificar el glicerol y venderlo como producto secundario de mayor valor (Marchetti, 2010).

Segunda generación

Los biocombustibles de segunda generación son aquellos que se producen a partir de biomasa lignocelulósica, principalmente cultivos dedicados, como pastos, y residuos agroindustriales. Así, los biocombustibles de segunda generación no compiten con los alimentos y se pretende utilizar suelos marginales, en dado caso que se trate de cultivos (Naik et al., 2010). En el caso de la producción de biodiesel por lo general se utiliza aceite de cocina usado (ACU). Existen también propuestas de utilizar cultivos no alimentarios, como jatrofa e higuera.

La ventaja del ACU es que el costo de la materia prima es de 2.5 a 3 veces más barata que el aceite vegetal, siendo que este último representa el 80% del costo total de producción de biodiesel de 1ª generación. El uso de aceites residuales y grasas tiene otra ventaja ambiental, puesto que disminuye la contaminación producida por los residuos generados cuando éstos no se disponen correctamente (cada litro de aceite residual contamina mil litros de agua) (Demirbas, 2009; Márquez Farfán, 2014).

En esta ruta tecnológica, el ACU se recolecta y transportan hasta un centro de acopio o la planta de producción de biodiesel. Antes de convertir el aceite residual a biodiesel, primero se sedimenta, se filtra y se seca para reducir la humedad y se vuelve a filtrar (Demirbas, 2009). Después de este pretratamiento de la materia prima, se realiza la reacción de esterificación ácida (debido al alto contenido de AGL) y después se realiza la reacción de transesterificación. El resto del proceso es igual al descrito anteriormente (Wang, Ou, Liu, & Zhang, 2007).

En la Figura 3 se observa el diagrama para la producción de biodiesel a partir de aceite residual.

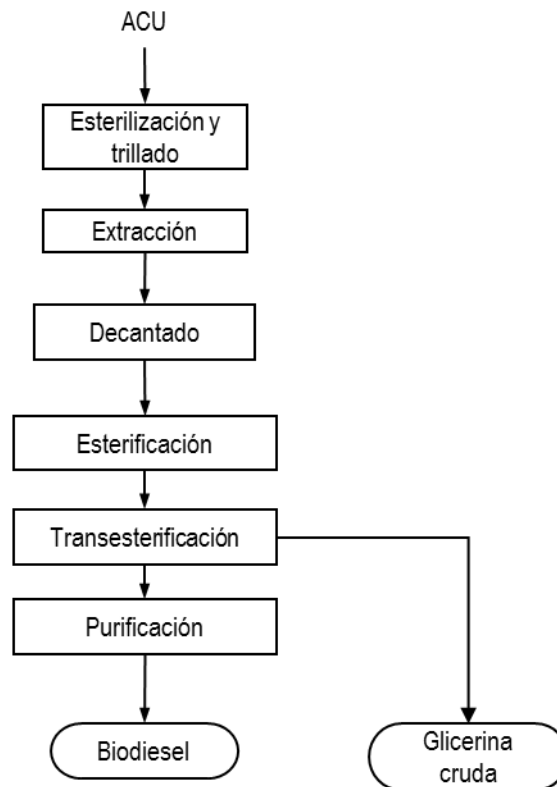


Figura 3 Diagrama de bloques para la producción de biodiesel a partir de ACU

Tercera generación

Los biocombustibles de tercera generación utilizan tecnologías emergentes que prometen obtener una mayor cantidad de biocombustible por una unidad de área con menores costos de producción. Se obtienen a partir de microorganismos, en el caso del biodiesel, a partir de microalgas o levaduras oleaginosas (Speight & Radovanovic, 2015).

Algunas ventajas del uso de levaduras es que estas crecen mucho más rápido que las microalgas, pues presentan tiempo de duplicación inferiores a una hora. Su cultivo no se ve afectado por condiciones ambientales, temporadas de cosecha o región geográfica como en el caso de los aceites vegetales y no compiten con la producción de alimentos. Las levaduras pueden crecer y acumular lípidos a partir de recursos renovables como residuos agrícolas, residuos industriales o cultivos no alimentarios. El escalamiento industrial es ligeramente más sencillo que en el caso de las microalgas. El cultivo de levaduras se realiza en un biorreactor convencional; esta etapa; sin embargo, la producción de biodiesel a partir de levaduras depende del desarrollo y la optimización que ocurre durante el proceso de fermentación, puesto que esta etapa es costosa. La fermentación ocurre en dos etapas: en la primera crecen las células microbianas y en la segunda, cuando

el nitrógeno es limitante, empieza la acumulación de lípidos (Koutinas, Chatzifragkou, Kopsahelis, Papanikolaou, & Kookos, 2014).

La levadura *Rhodosporidium toruloides* es una de las más estudiadas, es un microbio oleaginoso que puede convertir sustratos como el dióxido de carbono, azúcares y ácidos orgánicos a lípidos. Estos sustratos se obtienen de la industria alimentaria, materiales hidrófilos (melaza), y materiales hidrófobos (aceites vegetales, grasas industriales) (Sitepu et al., 2014). Otra especie estudiada es la *Yarrowia lipolytica*, la cual puede usar glicerina cruda como sustrato. La materia prima a utilizar debe ser pre-tratada antes de la conversión a lípidos (Juszczuk, Tomaszewska, Kita, & Rymowicz, 2013; Papanikolaou & Aggelis, 2010)

Para el proceso de producción de lípidos, primeramente, la levadura se incuba con el objetivo de que los microorganismos se acondicionen; luego se introduce el sustrato. La fermentación se puede llevar a cabo a temperatura ambiente y utilizando aire (Angerbauer, Siebenhofer, Mittelbach, & Guebitz, 2008). El caldo de fermentación se calienta a 65°C para desactivar las enzimas de las levaduras. La masa microbiana se separa del líquido de fermentación mediante filtración rotativa al vacío. Finalmente, la humedad del contenido de células microbianas se reduce a 1% o menos utilizando un secador con el objetivo de no reducir la eficiencia durante la transesterificación. La masa microbiana que contiene los lípidos puede ser tratada por medio de solventes y posteriormente llevar a cabo las reacciones necesarias para llevar a cabo la producción de biodiesel. Otra opción es llevar a cabo una transesterificación directa, sin extraer los lípidos de la masa microbiana, puesto que es un proceso más económico y con menos residuos, a costa de un menor rendimiento global (Koutinas et al., 2014). El principal reto de los biocombustibles de tercera generación es producir tecnología rentable que pueda competir con el diésel fósil (Sitepu et al., 2014).

En la Figura 4 se observa el diagrama de bloques para obtener biodiesel de tercera generación.

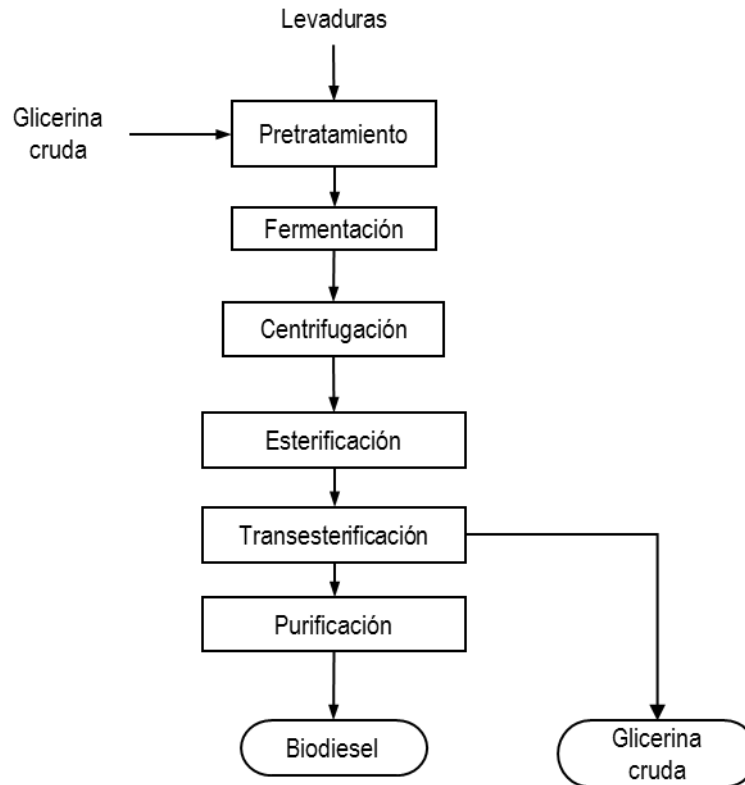


Figura 4 Diagrama de bloques para producir biodiesel a partir de levaduras

Análisis de ciclo de vida (ACV)

El análisis del ciclo de vida (ACV) es una metodología utilizada para evaluar cuantitativamente el impacto ambiental asociado a un producto o actividad. Implica conocer todos los flujos de energía y materia prima, así como los desechos producidos en todas las etapas del ciclo de vida del producto o actividad, de esta manera se estima el efecto hacia el medio ambiente desde la extracción y procesamiento de las materias primas, el proceso de producción, la distribución, el uso, el reciclado, y la disposición final de los residuos (Fullana, 2009).

Para realizar un ACV se requiere seguir las normas de la familia ISO 14040. Según esta norma, el ACV se realiza en cuatro etapas: 1) definición y el alcance del objetivo, 2) inventario del ciclo de vida, 3) evaluación del impacto ambiental y 4) la interpretación de los datos.

En la Figura 5 se muestran estas etapas de forma esquemática y las relaciones entre ellas.

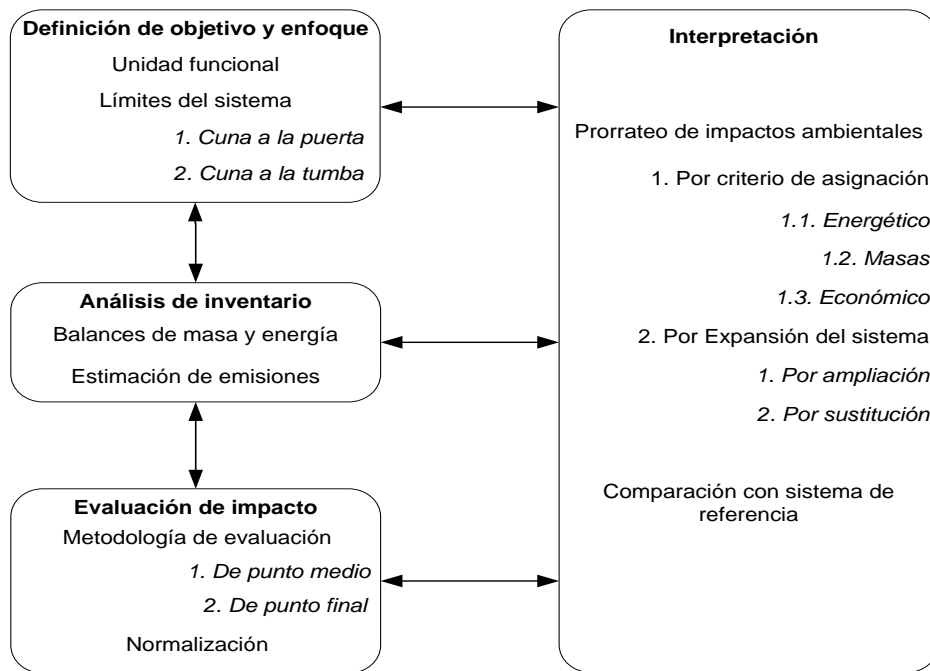


Figura 5 Etapas del análisis de ciclo de vida de un producto o actividad

A continuación, se describe cada una de estas cuatro etapas.

Definición y el alcance de objetivos. En esta etapa se eligen los impactos potenciales que se desean evaluar y el alcance del análisis. Éste debe de ser claro y fijo desde un principio. Se define también la unidad funcional (o base de cálculo) la cual debe de ser definida (ejemplo: 1kWh, una unidad de servicio, un coche, etc.), de acuerdo con la finalidad del estudio. Finalmente se trazan los límites espaciales y temporales del sistema, se describen las suposiciones acerca del proceso y se definen los procedimientos para llevar a cabo el análisis (Fullana, 2009).

Cuando las etapas incluidas en el ACV de un producto incluyen desde la obtención de materias primas, el transporte hacia el lugar de transformación y producción, el transporte y la distribución hacia el lugar de venta, el reciclado y la gestión de residuos, se le conoce como un ACV de la “cuna a la tumba” (Iriarte et al., 2012).

En la Figura 6 se muestra las etapas de un ACV de la cuna a la tumba (Iriarte et al., 2012).

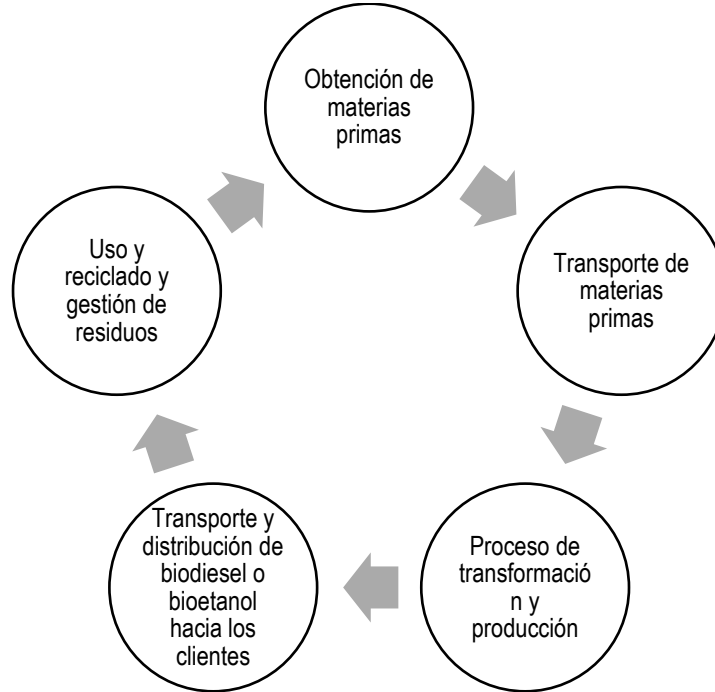


Figura 6 Etapas del ciclo de vida de un producto de la cuna a la tumba

Cuando los límites del sistema comprenden desde la obtención de materia prima hasta que el producto se pone en el mercado (cuando sale de la fábrica) se le conoce como “de la cuna a la puerta” (IHOBE, 2009).

El **inventario del ciclo de vida** se compone de los flujos de todas las entradas y salidas del sistema. Es un gran balance global del sistema, todos los materiales, los requerimientos de energía, y emisiones, en términos de la unidad funcional establecida (Iriarte et al., 2012). Durante la elaboración del inventario nos enfrentamos a una etapa crucial del ACV, puesto que hay procesos con múltiples entradas y salidas que cumplen con varias funciones diferentes es necesario optar por un método de asignación (o si es posible deben evitarse las asignaciones), es decidir qué parte de las cargas ambientales es asignado al producto de interés, con el objetivo de evitar que todas las emisiones del impacto a evaluar recaigan sobre el producto que nos interese, sino que también se repartan sobre los otros co-productos obtenidos (Kim & Dale, 2002).

La asignación de los impactos ambientales entre los diversos productos producidos puede hacerse por dos métodos: expansión del sistema (*system expansion*) o usando criterios de atribución. A su vez la expansión del sistema puede ser por sustitución de productos o por ampliación del sistema (Ahlgren et al., 2015). En los métodos de asignación por atribución, los impactos ambientales del sistema se reparten entre el

producto a estudiar y los productos secundarios respecto al contenido energético, económico, volumen o peso (Iriarte et al., 2012).

En la expansión del sistema por sustitución se selecciona uno de los productos de la cadena de suministro, al cual se le considera como el producto principal, y los demás son considerados como co-productos. Se asume que éstos sustituyen ciertos productos existentes en el mercado, evitando (o desplazando) así los impactos ambientales derivados de su producción. Estos impactos ambientales evitados se restan de los impactos ambientales calculados para todo el sistema bajo estudio y el resultado es asignado en su totalidad al producto principal (Ahlgren et al., 2015).

Por otro lado, la expansión del sistema por ampliación considera que los co-productos son una alternativa para suplir otros productos ya existentes en el mercado. En este último caso, los impactos ambientales totales se comparan con los impactos totales de un sistema alternativo hipotético, que se define de tal forma que se cubra las mismas necesidades que el sistema estudiado a través de productos comparables. Por lo que las cargas ambientales correspondientes a los co-productos se suman a las cargas ambientales que se producen en el sistema alternativo que proporciona el mismo servicio de los productos secundarios. Puesto que la expansión del sistema implica que se reemplazarán ciertos productos, al agregar estos cálculos, la incertidumbre aumentará (Iriarte et al., 2012).

La **evaluación del impacto ambiental** se realiza en tres pasos: clasificación, caracterización y normalización, siendo esta última opcional (Fullana, 2009). La caracterización del impacto ambiental puede hacerse con dos alcances diferentes: análisis de punto medio o análisis de punto final. Se dice que es de punto medio, cuando se considera la cadena de causa y efecto de una categoría de impacto ambiental, por ejemplo, potencial de calentamiento global. Estas características no representan las consecuencias finales de los impactos relacionados con los datos obtenidos en el inventario de ciclo de vida, sino una estimación del impacto que podría causar en función de la cantidad de emisiones contabilizadas.

Las categorías de impacto que por lo general se incluyen en el análisis de punto medio son: biodiversidad, disminución de recursos, ocupación de tierra, ecotoxicidad terrestre, disminución de los recursos abióticos, ecotoxicidad del agua, disminución de la capa de ozono, formación de ozono fotoquímico, consumo de agua, toxicidad humana, eutrofización, acidificación, consumo de energía y potencial de calentamiento global. Por otro lado, en el análisis de punto final, además de evaluar la causa y efecto del impacto ambiental medido en el análisis de punto medio, continúa realizando cálculos para medir los impactos probables sobre la biodiversidad, la disminución de recursos no renovables, y el ser humano (Bare, Hofstetter, Pennington, & De Haes, Helias A Udo, 2000; Shonnard et al., 2015).

En la Tabla 3 Se describen las principales categorías del impacto ambiental, donde se observa la unidad de caracterización y una pequeña descripción del impacto (IHOBE, 2009).

Tabla 3 Principales categorías del impacto ambiental

Categoría de impacto ambiental	Emisiones que lo provocan	Efectos	Factor de caracterización	Unidad de caracterización
Acidificación	Gases ácidos (SO ₂ , NO _x , HCl, etc.)	Perdida de la capacidad neutralizante del suelo y del agua. Debido a óxidos de azufre y nitrógeno descargado a la atmosfera. Lluvia ácida, acidificación del suelo, afecta el crecimiento de las plantas	Potencial de acidificación (AP)	kg SO ₂ eq.
Agotamiento abiótico	Aluminio, cromo, antimonio, hierro, bario, etc.	Disminución en la disponibilidad de la reserva de los recursos naturales, como minerales.	Potencial de agotamiento abiótico (ADP)	kg Sb eq.
Agotamiento abiótico (energía fósil)	Recursos fósiles	Disminución en la disponibilidad de la reserva de los recursos fósiles.	Potencial de agotamiento abiótico fósil (ADP fósil)	MJ
Calentamiento global	Gases de efecto invernadero (CO ₂ , CH ₄ , CFCs)	Incremento de la temperatura promedio de la atmosfera terrestre Reducción de la cantidad de calor liberada desde la Tierra hasta el espacio.	Potencial de calentamiento global (PCG)	kg CO ₂ eq
Reducción de la capa de ozono	Clorofluorocarbonos (CFCs)	Reducción de la capacidad para la protección de la radiación ultravioleta generada por el sol	Potencial de agotamiento de la capa de ozono (ODP)	kg CFC eq
Eutrofización	Exceso de nutrientes (NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺ , nitrógeno orgánico, PO ₄ ³⁻ , etc.)	Crecimiento excesivo de la población de algas, debido al empleo de fertilizantes y detergentes. Reducción de la biodiversidad	Potencial de eutrofización (EP)	kg PO ₄ eq
Potencial de Toxicidad	Compuestos tóxicos (metales pesados,	Compuestos químicos liberados al ambiente que ocasionan daños a la salud humana, así	Potencial de Ecotoxicidad Terrestre (TEP) Potencial de Ecotoxicidad Humana (HTP)	kg 1,4-DB eq

	diclorobenceno, etc.)	como en las poblaciones de animales o plantas en medios acuáticos y terrestres	Potencial de Ecotoxicidad de Agua Marina (MAEP) Potencial de Ecotoxicidad de Agua Fresca (FWAEP)	
Formación de oxidantes fotoquímicos	Compuestos orgánicos volátiles y NO _x	Formación de compuestos fotoquímicos, se forman cuando el sol incide sobre ciertos precursores, de los más conocidos se encuentra el ozono. Generación de smog	Potencial de formación de oxidantes fotoquímicos (POCP)	kg C ₂ H ₄ eq

En la etapa de clasificación, cada uno de los compuestos químicos y sustancias en las entradas y las salidas del inventario se asignan a una categoría de impacto ambiental de acuerdo a su efecto sobre el ambiente o el ser humano. Sin embargo, su potencial de daño es diferente, por lo que es necesario caracterizarlas con respecto a una unidad de caracterización por cada categoría de impacto. Para esto, se utilizan factores de caracterización para las diferentes sustancias. Por ejemplo, 1 kg CH₄ tiene un factor de caracterización de 23 kg CO₂eq en la categoría de potencial de calentamiento global (Fullana, 2009). En la etapa de caracterización, se pueden utilizar varias metodologías. Algunas metodologías utilizadas comúnmente se observan en la Tabla 4.

Tabla 4 **Metodologías de evaluación de impacto ambiental para el ACV.**

Metodología	Etapa de la evaluación de impactos implicados	Categoría de impacto ambiental	Descripción
Eco-indicator 99	Clasificación, caracterización, normalización, agrupación y ponderación	Carcinogénicos, respiratorios orgánicos, respiratorios inorgánicos, cambio climático, radiación, destrucción capa ozono, ecotoxicidad, acidificación y eutrofización, uso de suelo, uso de recursos minerales y uso de combustibles fósiles	En lugar de evaluar cada una de las categorías de impacto, se evalúan los diferentes daños causados por estas categorías de impacto, agrupándolos en tres niveles de daño: daños a la salud Humana, daños a la calidad del ecosistema y daños a los Recursos. Es de punto final.
ReCiPe	Clasificación, caracterización, normalización, agrupación y ponderación	Destrucción capa ozono, toxicidad humana, radiación, smog fotoquímico, formación particulados, cambio climático, ecotoxicidad al suelo, acidificación al suelo, ocupación suelo rural, ocupación suelo urbano,	Es una combinación de Eco-indicator 99 y del CML 2001. Donde se han mejorado los modelos para el cambio climático, la destrucción de la capa de ozono, acidificación, eutrofización, uso del suelo y agotamiento de recursos naturales. A su vez se han actualizado factores de

		transformación suelo natural, ecotoxicidad marina, eutrofización marina, eutrofización agua dulce y ecotoxicidad agua dulce	caracterización para algunas categorías de impacto y para el paso de normalización
CML 2001	Clasificación, caracterización, normalización con respecto a la agrupación y ponderación son usados por el método pero no siempre son utilizados	Agotamiento de los recursos Abióticos, cambio climático, destrucción capa ozono, toxicidad humana, ecotoxicidad, smog fotoquímico, acidificación, eutrofización y uso de recursos	El paso de la normalización es opcional. Es de punto medio y una de sus ventajas es su solidez científica
IPCC 2001	Clasificación y caracterización	Cambio climático	Recoge los factores de caracterización para el potencial del calentamiento global directo debido a emisiones al aire.
IMPACT 2002+	Clasificación, caracterización, normalización, agrupación y ponderación	Toxicidad humana, efectos respiratorios, radiación ionizante, destrucción capa ozono, smog fotoquímico, ecotoxicidad acuática, ecotoxicidad del suelo, acidificación acuática, acidificación del suelo, acidificación y eutrofización del suelo, ocupación del suelo, cambio climático, energías no renovables y uso de recursos	Es el resultado de combinación entre las metodologías IMPACT 2002, Eco-indicator 99, CML2001 e IPCC.
EPS2000	Clasificación, caracterización y ponderación.	Salud humana, capacidad de producción del ecosistema, reserva de recursos abióticos, diversidad biológica y valores culturales	Es un método orientado al daño causado.

Fuente:(IHOBE, 2009)

El paso de normalización es opcional. Consiste en comparar los resultados obtenidos de cada categoría, referenciando otro sistema parecido, basándose en las emisiones anuales en la región, donde se convierten los resultados de la caracterización a unidades globales neutras, dividiendo cada uno por un factor de normalización, finalmente a través de estos factores se representa el grado de contribución de cada categoría sobre el problema ambiental de una región (Fullana, 2009).

La última etapa del ACV de acuerdo con ISO es la ***interpretación de los resultados***. Esta contiene los siguientes puntos: la identificación de los puntos relevantes con respecto al medio ambiente, una evaluación y las conclusiones y recomendaciones (Fullana, 2009).

ACV del biodiesel

Los biocombustibles tienen el propósito de reducir las emisiones de CO₂ producidas en la producción y el uso de combustibles fósiles. En Estados Unidos, se estableció durante el 2010 por *Renewable Fuel Standard*, que los biocombustibles de primera generación deben reducir al menos en 20% la emisión de gases, mientras que para biocombustibles de segunda generación y tercera generación la reducción debe ser del 50% y a partir de productos lignocelulósicos de 60% (Iriarte et al., 2012).

Sin embargo, debido a los desafíos que ha traído la producción de biocombustibles, es necesario determinar su impacto ambiental utilizando el ACV. Los resultados indican que los biocombustibles evaluados pueden presentar diferencias debidas a la región geográfica donde se producen los biocombustibles, las diferentes materias primas a utilizar, las rutas tecnológicas para producir biocombustibles, incluso la metodología para modelar y realizar el ACV trae como resultado, diferentes conclusiones en un mismo sistema. La aplicación del método de asignación, así como los supuestos realizados por diferentes investigadores, son algunos factores que determinan las diferencias entre los ACV (Morais, Martins, & Mata, 2010).

La Agencia Internacional de Energía realizó estudios con diversas materias primas para producir biodiesel a partir de aceite de palma, aceite de colza (biodiesel de primera generación) y materia prima de origen lignocelulósico (biodiesel de segunda generación), con el objetivo de obtener las emisiones de gases de efecto invernadero y comprobar si es posible una mitigación del biodiesel con respecto al diésel fósil. El estudio concluyó que la reducción de gases de efecto invernadero, únicamente serían significativos para los biocombustibles de origen lignocelulósico, con una mitigación entre el 60 hasta un 120% con respecto al diésel. Con respecto al biodiesel a partir de aceite de palma y colza, la mitigación con respecto al diésel es menor de un 60%. Si bien, el biodiesel de primera y segunda generación ayuda a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero al compararlo con el diésel fósil, existe una diferencia entre la ruta tecnológica de primera y segunda generación con respecto al potencial de mitigación. (Eisentraut, 2010).

En un estudio realizado en Tailandia y Malasia, se analizó la producción de biodiesel a partir de aceite de palma. Los resultados obtenidos demuestran que este sistema registró valores de impacto más alto, al comparar con un sistema alternativo, para el potencial de toxicidad humana y el potencial de ecotoxicidad de agua fresca. De igual manera el consumo de energía excede 3,497 MJ al año para el potencial de reducción de los recursos abióticos fósiles en comparación con los resultados obtenidos en Malasia que exceden 1,628 MJ al año. Esto se debe al uso de pesticidas y fertilizantes ocupados en

Tailandia, lo que influyo a que se elevaran los valores de impacto (Norfaradila, Norela, Salmijah, & Ismail, 2014).

Otro estudio (Morais, Martins, & Mata, 2010) analizó las variaciones entre los resultados obtenidos al utilizar diferentes metodologías de evaluación de impacto ambiental y métodos de asignación. Usando un método de asignación por atribución energética, másica y económica, presento diferentes resultados. La asignación por atribución energética y económica es similar, sin embargo, cuando se utiliza la atribución másica es completamente diferente, para el caso de la asignación energética el potencial de calentamiento global fue 1.5 más alto, que al usar la asignación másica.

Otro estudio realizado en la región de Copacabana, en Rio de Janeiro, usando como materia aceite de cocina reciclado de hoteles, restaurantes, etc. para producir biodiesel determino que no existe mitigación en la categoría de impacto de potencial de eutrofización. De igual manera, el alcohol a utilizar para la reacción de transesterificación es el etanol, siendo la producción de etanol el principal causante del impacto potencial de toxicidad humana (87%) y eutrofización (71%). Con respecto a la combustión del biodiesel se encontró que contribuye al potencial de acidificación y oxidación fotoquímica (de Pontes Souza, Mendonça, Alves Nunes, & Valle, 2012).

Justificación

Debido a la gran dependencia del combustible fósil, la demanda de diésel en México seguirá incrementando anualmente 3.6% (SENER, 2016) y con ella, las emisiones de CO₂ generadas durante su producción y uso. Por esto, es de gran importancia desarrollar tecnologías capaces de disminuir el impacto ambiental y cumplir con el compromiso adoptado en el Acuerdo de París de reducir en 22% las emisiones de GEI (SEMARNAT 2015). Actualmente el Centro Mexicano de Innovación en Energía, CEMIE-BIO, junto con la inversión del Fondo de Sustentabilidad Energética, está realizando actividades con el propósito de elaborar productos especializados a partir de la biomasa en el país, uno de ellos es el biodiesel. El presente trabajo está enfocado a desarrollar una investigación como parte del Clúster de Biodiesel Avanzado del CEMIEBio para dimensionar el potencial de mitigación de las diferentes tecnologías disponibles en México para producir biodiesel a corto y mediano plazo.

Actualmente, el país cuenta con empresas establecidas en vías de desarrollo, que producen y venden biodiesel a partir de ACU. Sin embargo, se desconoce el potencial que tiene el país para generar biodiesel a partir de ACU y aceites de primera generación sin comprometer la producción de alimento, a la vez del potencial de reducción de emisiones de estas tecnologías. Por esto, el presente trabajo elaborará una base de datos que involucre la producción y distribución de biodiesel, aclarando el diagnóstico de la situación del biodiesel en México y su potencial de producción.

Puesto que recientes estudios realizados en otros países han demostrado que el uso de biocombustibles como el biodiesel han traído desafíos tanto económicos como ambientales (Iriarte et al., 2012), el presente estudio reporta el ACV de dos rutas tecnológicas representativas del país y una ruta potencial para biodiesel de 3^a generación de biodiesel. Caracterizar y evaluar una ruta tecnológica de 3^a generación es en sí misma una actividad innovadora y contribución de este trabajo.

Finalmente se comparan los resultados del impacto ambiental de las tres rutas tecnológicas escogidas con respecto al diésel. Estos resultados presentan el panorama general de la situación actual del biodiesel en el país, de su potencial de producción, así como del impacto ambiental y del análisis beneficio/costo, dando pautas para que se seleccionen mejores rutas tecnológicas en el futuro a corto y mediano plazo.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar los impactos ambientales de las rutas tecnológicas actuales y potenciales de producción de biodiesel en México.

Objetivos particulares

1. Identificar las rutas tecnológicas potenciales a corto plazo y mediano plazo para la producción de biodiesel en México.
2. Realizar el inventario de materiales y energía involucrados en las rutas tecnológicas potenciales en el país para el biodiesel.
3. Evaluar los impactos ambientales potenciales en el ciclo de vida de cada ruta tecnológica.

MATERIALES Y MÉTODOS

En la Figura 7 se observa el diagrama de bloques de la metodología seguida para alcanzar los objetivos.

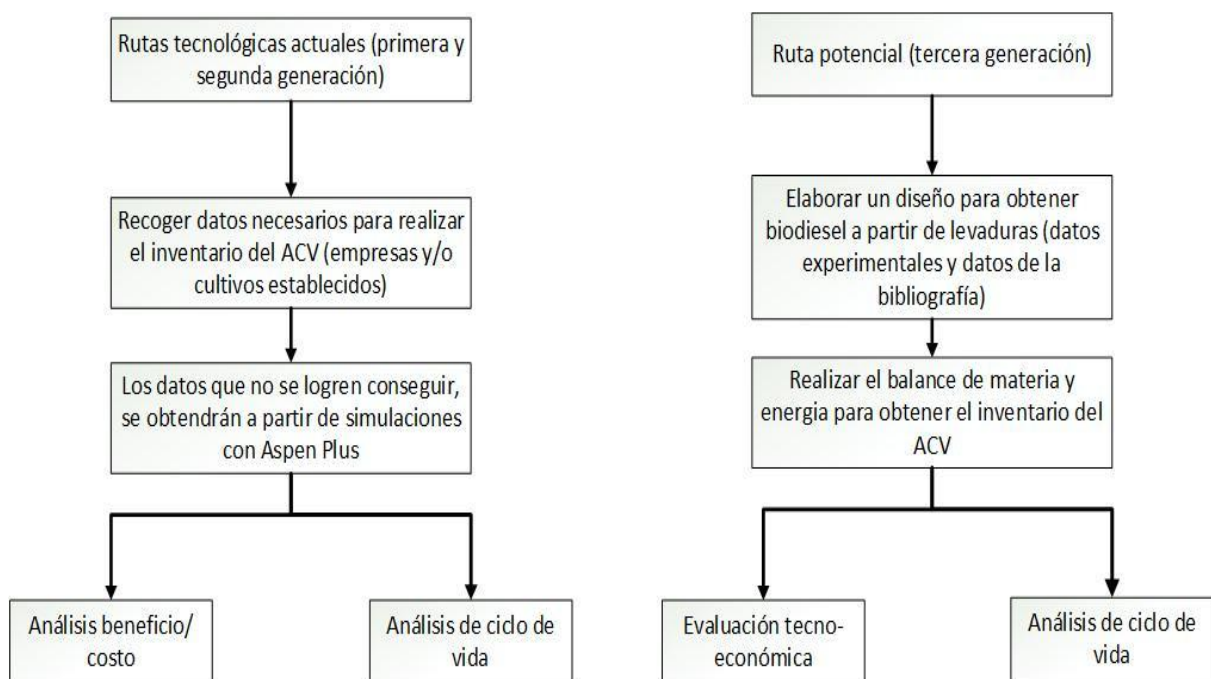


Figura 7 Diagrama de bloques de la metodología a utilizar

Para la ruta tecnológica de primera generación se consideró el aceite de palma para producir biodiesel, debido a que algunos estados del país cuentan con las condiciones climáticas necesarias para su producción, por lo que se cuentan ya con datos históricos del manejo del cultivo, cosecha y extracción de aceite. Por otra parte, estudios realizados en otros países han determinado que la palma de aceite tiene ventaja sobre otros aceites vegetales como la soja, colza, o girasol. Una de ellas es que la palma de aceite es un cultivo perenne, esto quiere decir que la producción de aceite es continua y sin interrupciones (Mekhilef, Siga, & Saidur, 2011). Otro aspecto es que la producción de aceite de palma tiene un mayor rendimiento de producción en comparación con la soja, colza y/o semilla de girasol, el rendimiento del aceite de palma tiene un factor de diez más que los cultivos mencionados anteriormente (Mekhilef et al., 2011; Pleanjai, Gheewala, & Garivait, 2007).

En el caso de la ruta tecnológica actual de segunda generación se consideró el ACU, debido a que actualmente existen empresas operando en el país. Estas empresas cuentan con un sistema de recolección principalmente de restaurantes, plazas comerciales, hoteles entre otros. Durante el 2015 el país produjo 1.9 millones de toneladas métricas de aceites

y grasas, esta producción aumenta cada año con una tasa anual de 0.5% (ANIAME, 2015). De acuerdo a estudios realizados anteriormente es posible recuperar hasta un 30% de los aceites una vez utilizados (Kumaran, Mazlini, Hussein, Nazrain, & Khairul, 2011; Nazrain, Kumaran, Saifuddin, & Hussein, 2004; Sheinbaum-Pardo, Calderón-Irazoque, & Ramírez-Suárez, 2013), debido a esto es una materia prima disponible para la producción de biodiesel en el país, cuya tecnología y rendimientos ya existen.

Para la ruta tecnológica potencial de tercera generación se optó por la utilización de la glicerina cruda resultante de la producción de biodiesel como sustrato para producir aceite a partir de levaduras. Debido a que la producción de biodiesel ha aumentado, ocurre lo mismo con la producción de glicerina, por lo que actualmente hay una sobreoferta de glicerina cruda. A pesar de que el glicerol puro es utilizado en la industria alimenticia, farmacéutica, cosméticas, entre otras, es demasiado costoso purificar glicerina cruda, especialmente para productores medianos y pequeños de biodiesel (Pachauri & He, 2006). Estudios recientes han determinado que es posible utilizar glicerina cruda como sustrato para obtener lípidos por medio de levaduras y posteriormente producir biodiesel (Koutinas et al., 2014; Papanikolaou & Aggelis, 2010; Speight & Radovanovic, 2015). Algunas ventajas en la producción de lípidos por medio de levaduras son: la escala industrial aparentemente es más fácil que en el caso de microalgas, de igual manera crecen mucho más rápido y presentan tiempos de duplicación inferiores a una hora (Koutinas et al., 2014; Speight & Radovanovic, 2015).

Potencial de producción de biodiesel en el país

En esta sección se describe el método para estimar la disponibilidad de de aceite para la producción de biodiesel a partir de ACU y aceite de palma

Aceite disponible a partir de palma aceitera

Para estimar el potencial de superficie que es posible plantar con palma aceitera para producir biodiesel, se tomaron los resultados de un estudio realizado por SAGARPA-INIFAP (2012). Dicho estudio determinó por medio de SIG (sistemas de información geográfica) las condiciones necesarias para el crecimiento de la palma aceitera, entre ellas: el uso y tipo del suelo, temperaturas (máxima, media y mínima), lluvia, altitud, pendiente y el clima. Este estudio determinó que es posible establecer plantaciones nuevas de palma aceitera en cuatro estados de la república: Campeche, Chiapas, Veracruz y Tabasco. En este estudio se determinó, además, que las plantaciones nuevas de palma aceitera deberán primeramente cubrir la demanda nacional de aceite de palma y el excedente podría dirigirse a la producción de biodiesel, considerando que la demanda de aceite de palma para la industria alimentaria seguirá creciendo linealmente como en los últimos 5 años.

Aceite disponible a partir de ACU

Se estimó la disponibilidad de aceite de cocina usado (ACU) en el país, considerando que la recolección de ACU es proporcional al consumo nacional de aceite de cocina vegetal. Puesto que recolectar la totalidad del ACU del país y dirigirlo a un solo mercado (en este caso la producción de biodiésel) implica desafíos logísticos y económicos, este reporte consideró la recolección únicamente en zonas metropolitanas del país, del periodo comprendido del 2016 al 2040. El potencial de recuperación se estimó a partir de la siguiente ecuación:

$$ACU = Aco F_r F_c$$

dónde: ACU representa el volumen anual de aceite de cocina recuperado

Aco representa el consumo nacional de aceite vegetal fresco

F_r , representa la fracción recuperable de aceite después del uso del aceite vegetal (se utilizó un valor de 30% (Kumaran, Mazlini, Hussein, Nazrain, & Khairul, 2011; Nazrain, Kumaran, Saifuddin, & Hussein, 2004; Sheinbaum-Pardo, Calderón-Irazoque, & Ramírez-Suárez, 2013)

F_c , representa la fracción de aceite que es recolectada.

La fracción de aceite que se recolecta se basó en la población del país, a partir del censo de población de 2010 (INEGI, 2010), y en que el 56.79% (representa el valor de F_c) de la población mexicana está concentrada en 59 zonas metropolitanas.

El consumo anual de aceite vegetal fresco Aco se estimó utilizando dos métodos. En el primero, se tomó en cuenta los datos de la Asociación Nacional de Industriales de Aceites y Mantecas Comestibles, A.C. (ANIAME, 2015), donde se establece el consumo anual en México. El reporte de la ANIAME también menciona que la tasa anual de crecimiento en el consumo de aceites y grasas es de 0.5%; con estos datos se determinó el potencial de recuperación de ACU para años posteriores. De los dos métodos, éste predice cantidades mayores, por lo que se le designa la “estimación alta”.

Para el segundo método de estimación, se calculó la cantidad de aceite disponible a partir del dato de que, en 2010, un mexicano en promedio consumió 10 L de aceite de cocina al año (Profeco, 2010). Utilizando un crecimiento estimado de la población del 1.4% a partir del 2010, se estima el aceite consumido multiplicando el consumo per cápita por la población en las zonas metropolitanas (45,136,250 habitantes en 2010).

Aceite disponible a partir de glicerina cruda

En el caso del proceso basado en levaduras oleaginosas, se consideró la cantidad de glicerina cruda proveniente de la producción de biodiésel de las dos rutas tecnológicas descritas anteriormente, en el mismo periodo de 2016 al 2040.

Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

En esta sección se describe las rutas tecnológicas estudiadas, el enfoque y objetivo del ACV, que incluye la unidad funcional, las fronteras del sistema y el sistema alternativo (diésel). De igual manera se presenta la obtención del inventario del ciclo de vida, la evaluación del impacto, el consumo de agua fresca, así como la razón de energía neta.

Definición de objetivo y enfoque: El análisis se centró en la caracterización del sistema completo de cada ruta tecnológica, considerando el producto principal (biodiésel) y los co-productos. Se determinó el *retorno neto de energía*, el *consumo de agua fresca* en el ciclo de vida y la *capacidad de mitigación* de los siguientes impactos potenciales: de calentamiento global (Global warming potential, GWP), reducción de recursos abióticos (Abiotic depletion potential, ADP), toxicidad humana (Human toxicity potential, HTP) y creación de ozono fotoquímico (Photochemical ozone creation potential, POCP); así como las contribuciones relativas en los impactos de: acidificación (Acidification potential, AP), eutrofización (Eutrophication potential, EP), reducción de la capa de ozono (Ozono layer depletion potential, OLDP), ecotoxicidad de agua fresca (Freshwater aquatic ecotoxicity potential, FAEP), ecotoxicidad de agua marina (Marine aquatic ecotoxicity potential, MAEP), ecotoxicidad terrestre (Terrestrial ecotoxicity potential, TEP).

La *Unidad funcional* para cada sistema de bioenergía corresponde a la combinación de productos del sistema de producción de biodiésel a partir de aceite de palma, ACU y levaduras entre los años de 2016 a 2040 (para cada ruta tecnológica). Por conveniencia, los resultados se reportan referidos a 1 MJ de biodiésel consumido bajo las condiciones señaladas.

Los *límites del sistema*: para cada sistema de bioenergía se consideró de la cuna a la tumba, sin incluir las etapas de fabricación de maquinaria ni desmantelamiento de la infraestructura. La frontera temporal se definió del periodo comprendido del 2016 a 2040 en función del tiempo necesario para que se reflejen todas las actividades del ciclo de vida del sistema, desde el establecimiento, actividades anuales, y actividades de cierre o preparación para el siguiente ciclo productivo en el caso de la palma de aceite.

Inventario de ciclo de vida: Los datos necesarios para generar el inventario del ciclo de vida preferentemente son datos de primera mano, la etapa industrial se obtuvo levantando directamente de productores nacionales representativos (datos recabados de primera mano) a partir de encuestas, comunicación personal y visitas industriales, que producen biodiésel; en el caso del biodiésel a partir de aceite de palma, la etapa agrícola se obtuvo a partir de plantaciones establecidas, así como paquetes tecnológicos existentes en el país. Los datos que no se pudieron definir de las encuestas (principalmente algunos insumos de energía y servicios auxiliares) se estimaron usando el *software* Aspen Plus 8.4 y complementando con literatura científica especializada. En el caso de biodiésel a partir de levaduras los datos necesarios para el cultivo de la levadura (*Yarrowia lipolytica*) y la

obtención de aceite se se utilizaron los datos experimentales obtenidos del CIATEJ Unidad Guadalajara (Dra. Georgina Sandoval). Los datos que no se pudieron obtener se usaron modelos o simulaciones en software Aspen Plus 8.4 con datos mexicanos, y por último, se recurrieron a modelos y bases de datos relevantes. Los datos obtenidos en bases de datos como ecoinvent®, provinieron de sistemas de atribución por criterios de asignación.

En el caso de las emisiones debidas al uso de fertilizantes minerales por emisiones de gases nitrogenados en suelos agrícolas se utilizaron los modelos de la Roundtable for Sustainable Biomaterials (RSB). Para estimar las correspondientes emisiones de metales pesados, se usaron los modelos de la Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART) Research Station. Mientras que las emisiones debidas al cambio de uso de suelo, se incluyó únicamente el efecto del cambio de uso de suelo directo, usando los modelos de la RSB. Las emisiones de aguas residuales y residuos dispuestos en vertederos abiertos se obtuvieron por medio de los modelos propuestos por la IPCC.

Métodos de asignación o reparto: los resultados se reportaron usando asignación por expansión del sistema por ampliación. En este método, se comparan uno a uno los impactos totales de cada ruta tecnológica con un sistema alternativo hipotético, por lo que se incluyen las cargas ambientales correspondientes a los co-productos. Adicionalmente, se reportaron los resultados por el criterio de atribución energética.

El *sistema alternativo*: se definió como un sistema específico para cada ruta tecnológica. Es un sistema hipotético que provee los mismos servicios (en calidad y cantidad) que el sistema de bioenergía. Por ejemplo, puesto que el biodiesel sustituye al diésel, el sistema alternativo comprende la producción y uso de diésel, de la cuna a la tumba. De igual manera se tratan los co-productos obtenidos durante la producción de biodiesel en cada ruta tecnológica. Los co-productos alternativos se definieron como aquellos con mayor probabilidad de ser reemplazados por los productos del sistema de bioenergía, de acuerdo al mercado mexicano y en la región relevante para el análisis. En cada una de las rutas tecnológicas estudiadas el sistema alternativo está compuesto por el diésel y sulfato de potasio. En el caso de la glicerina cruda, puesto que no existe un producto alternativo que tenga el mismo uso más que glicerina cruda de otro proceso de biodiesel (debido a su grado de impureza), se considera que este co-producto no mitiga emisiones pues no sustituye a ningún producto alternativo. El biodiesel por su parte sustituye al diésel según su contenido energético (poder calorífico inferior), y el sulfato de potasio sustituye el mismo componente, pero de origen mineral. En el caso del aceite de palma se considera que existirá cambio de uso del suelo al establecer las nuevas plantaciones sobre antiguos pastizales.

5. Para el caso de este estudio se consideraron las sustituciones descritas en la Tabla 5.

Tabla 5 Productos del sistema alternativo y relaciones de sustitución para cada producto

Sistema de bioenergía (unidad de comparación)	Sistema alternativo (cantidad desplazada) *	Criterio de reemplazo y referencia
Cultivo agronómico (1 ha)	Pastizal (1 ha)	Las plantaciones nuevas se establecerán en tierras donde se encuentren pastizales manejados (Garcia et al., 2013; Sagarpa-Inifap, 2012).
Biodiesel, 39.8 MJ/kg (1 kg), a partir de ACU (Joshi & Pegg, 2007; Phan & Phan, 2008).	Diésel fósil, 45.1 MJ/kg	Cantidad de energía liberada en la combustión obtenida en la bibliografía. El poder calorífico del diésel se obtuvo de un reporte de PEMEX (PEMEX).
Biodiesel, 37 MJ/kg (1 kg), a partir de aceite de palma (Joshi & Pegg, 2007).		
Biodiesel 39.6 MJ/kg a partir de Levaduras (Bozbas, 2008)		
Glicerina cruda (1 kg)	Glicerina cruda obtenida de aceite de soya reciclado (0 kg)	La glicerina cruda producida compite con glicerina cruda de otros procesos de producción de biodiesel, por lo que no mitiga emisiones con respecto al sistema alternativo.
Sulfato de potasio (1 kg)	Sulfato de potasio (1 kg)	El sulfato de potasio es un compuesto muy utilizado como fertilizante. Aunque el fertilizante de potasio más común es el cloruro de potasio, puesto que algunos cultivos son sensibles al cloruro se considera que el sulfato de potasio no es un sustituto directo de éste (González & Romero, 2010)
Aceite y harina de palmiste (1 kg)	Aceite y harina de palmiste (0 kg)	El aceite y la harina de palmiste producidos en el sistema alternativo tienen las mismas emisiones que en el sistema de bioenergía, pues se derivan de la misma cadena productiva. Por lo tanto, no mitigan emisiones con respecto al sistema alternativo.

En el caso de la atribución energética, se realizó un rastreo de las sub-operaciones que constituyen todo el ciclo de vida, de manera que a cada sub-producto se le asignaron emisiones proporcionales a la energía (se usó el poder calorífico inferior de los co-productos principales) de las corrientes involucradas en su producción, y no en la producción de otros co-productos independientes

Las etapas incluidas en el ciclo de vida de la bioenergía son etapa agronómica, transporte, industrial, distribución y uso de biodiesel y gestión de residuos. Cabe mencionar que en el caso de la ruta tecnológica de aceite de palma es la única que contempla la etapa agronómica, dentro de esta se incluye el cambio de uso de suelo. Mientras que la ruta tecnológica potencial (biodiesel a partir de levaduras) únicamente cuenta con tres etapas; la industrial, distribución y uso y gestión de residuos.

En la *etapa agronómica* se incluyeron las actividades y procesos necesarios para la generación de biomasa. Esta es inexistente en el ACV del biodiesel a partir de ACU y de levaduras. Las emisiones en esta etapa provienen del uso de pesticidas, fertilizantes, herbicidas e insecticidas y de las emisiones resultantes por el cambio del uso del suelo. El cambio de uso de suelo se refiere a los impactos generados por el uso previo de la tierra, se consideró en el estudio el cambio de uso de suelo directo (CUSd), esto quiere decir, que se propone sembrar cultivos de palma aceitera, sobre un área de tierra con uso previo de pastizales. En este caso las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), traen consecuencias a balances positivos de carbono puesto que las plantaciones anteriores tienen un bajo contenido de carbono.

La *etapa de transporte* se consideró como etapa al envío de la biomasa producida en la etapa agronómica hasta las instalaciones en donde se transforma a bioenergía, en el caso de biodiesel a partir de aceite de palma.

La *etapa industrial* constó de todas aquellas actividades involucradas en la transformación de la biomasa en biodiesel y los respectivos co-productos en cada ruta tecnológica.

La *etapa de distribución y uso de biodiesel* cuantifico principalmente las emisiones generadas por la quema de combustibles de transporte necesario para la logística de distribución de todos los productos del sistema de bioenergía, desde las instalaciones en donde se producen hasta los sitios en donde se les da el uso final. En el caso del uso del biodiesel se refiere a aquellas generadas en la combustión, esta etapa es crucial cuando se quiere comparar el desempeño ambiental del biodiesel contra el diésel, puesto que en esta etapa se reflejan los beneficios de la neutralidad del carbono del biodiesel, pero también en esta etapa pueden haber diferencias importantes en cuanto a emisiones en otras categorías de impacto ambiental, como la emisión de material particulado, carbono negro (*soot*) y emisiones de orgánicos volátiles, SO_x, NO_x, entre otros.

La etapa de gestión de residuos se consideró las emisiones generadas durante los procesos de gestión de residuos como tratamiento de aguas residuales y de disposición final de materiales de desecho.

Evaluación del impacto: se empleó la metodología CML-IA V3.03 de punto medio para evaluar los impactos ambientales potenciales en las categorías de línea base. Se presentan primero los siguientes indicadores: consumo de agua fresca en el ciclo de vida (WC), razón de energía neta (NER), potencial de calentamiento global (GWP), potencial de creación de ozono fotoquímico (POCP) y potencial de toxicidad humana (HTP). Otros impactos ambientales considerados en el estudio: reducción de recursos abióticos (ADP), acidificación (AP), eutrofización (EP), reducción de la capa de ozono (OLDP), ecotoxicidad de agua fresca (FAEP), ecotoxicidad de agua marina (MAEP), ecotoxicidad terrestre (TEP). Los factores de emisión derivados de la producción de materias primas se obtuvieron de la base de datos ecoinvent 3.2.

La razón de energía neta (NER) resulta de la división del contenido energético del biodiesel y el contenido energético en los vectores energéticos fósiles requeridos por el sistema en su ciclo de vida, según sus poderes caloríficos inferiores (PCI), obtenido a partir del SimaPro. Mientras que en el caso del consumo de agua fresca a lo largo del ciclo de vida se estimó considerando tanto los datos de consumo directo (obtenidos directamente de los cuestionarios a las empresas), como los consumos de agua asociados a los insumos de todos los procesos incluidos en los límites del sistema tomados de la base de datos ecoinvent 3.2.

Interpretación: En este paso se analizaron los resultados obtenidos para cada una de las etapas incluidas en cada ruta tecnológica estudiada. La interpretación permitió identificar los insumos que son contribuyentes mayoritarios en cada categoría de impacto ambiental y presentar recomendaciones para el mejoramiento del desempeño ambiental de cada ruta tecnológica. A partir de este análisis se describieron las conclusiones generales de los impactos ambientales potenciales y se determinó cuál o cuáles son los puntos críticos del sistema, qué etapa del sistema tiene un mayor impacto y se comparó entre cada ruta tecnológica estudiada y el sistema alternativo.

Análisis beneficio/costo

En esta sección se describe el análisis beneficio/costo para las rutas tecnológicas de primera y segunda generación. En el caso de la ruta tecnológica potencial se realizó un estudio tecno-económico debido a que es un caso de estudio nuevo.

En este estudio se consideró el cálculo del beneficio de producto bruto (BPB), en la fórmula 1 se observa.

$$BPB = \text{Producto (kg o l)}(\text{precio del producto (kg o l)}) \quad (1)$$

El retorno bruto se calculó a partir de la fórmula 2.

$$\text{Retorno bruto} = BPB - CVP \quad (2)$$

Donde CVP es el costo variable de producción.

El retorno neto se calculó a partir de la fórmula 3

$$\text{Retorno neto} = BPB - CTP \quad (3)$$

Donde CTP es el costo total de producción.

La relación beneficio/costo (BC) se calculó a partir de la fórmula 4.

$$BC = \frac{BPB}{CTP} \quad (4)$$

Basado en (Mohammadshirazi, Akram, Rafiee, & Kalhor, 2014).

El CVP incluye; la obtención de materias primas (considerando catalizadores y solventes), mano de obra (incluyendo la supervisión), servicios (agua, electricidad, energía térmica, etc.), mantenimiento y reparaciones (se consideró 0.6% del costo fijo de inversión) (Peters, Timmerhaus, West, Timmerhaus, & West, 2003).

El CTP está compuesto por el CVP y el costo fijo de producción (CFP), que incluye renta, impuestos y los gastos administrativos que equivale a un 20% del costo de mantenimiento y mano de obra (Peters et al., 2003).

En el caso de la ruta tecnológica potencial de tercera generación usando levaduras se realizó un análisis tecno-económico para esto se obtuvieron los costos totales de producción, utilizando el Método C descrito por Peters & Timmerhaus, 2003 como se ilustra en la Tabla 6.

Tabla 6 Calculo del costo total de producción

Materias primas	
Mano de obra de operación	
Supervisión del funcionamiento de la planta	Equivale a un 15% de la mano de obra de operación
Servicios	
Mantenimiento y reparaciones	6% de capital fijo de inversión
Suministros operativos	15% de mantenimiento y reparaciones
Cargos de laboratorio	15% de mano de obra de operación
Regalías	1% del costo total de producción
Costo variable	Equivale a la suma de materias primas, mano de obra, supervisión del funcionamiento de la planta, servicios, mantenimiento y reparaciones, suministros operativos, cargos de laboratorio y regalías
Impuestos	1% de capital fijo de inversión
Financiación	1% de capital fijo de inversión
Seguro	1% de capital fijo de inversión

Renta	1% de capital fijo de inversión
Costo fijo	Equivale a la suma de impuestos, financiación, seguro y renta
Costo de manufactura	Equivale a la suma del costo variable y fijo
Administración	2% De supervisión, mano de obra y mantenimiento
Distribución y ventas	5% del costo total de producción
Investigación y desarrollo	4% del costo total de producción
Costos generales	Suma de costo de administración, distribución y ventas e investigación y desarrollo
Costo total de producción	Suma del costo de manufactura y costos generales

(Peters et al., 2003)

Para obtener el capital fijo de inversión se tomó en cuenta el método descrito por Peters y Timmerhaus (2003) como se ilustra en la Tabla 7.

Tabla 7 Cálculo del capital fijo de inversión

Costos directos	% del costo de equipos
Costo total de equipos	100
Instalación de los equipos	39
Instrumentación y control	26
Bombas	31
Sistema eléctrico	10
Construcción incluida los servicios	29
Terreno	12
Instalación de los servicios	55
Costo directo total	302
Costos indirectos	
Ingeniería y supervisión	32
Gastos de construcción	34
Gastos legales	4
Tarifa del contratista	19
Contingencia	37
Costo indirecto total	126
Capital fijo de inversión	428
Capital de trabajo (15% costo total capital de inversión)	75
Capital total de la inversión industrial	503

Para obtener el costo de equipos es necesario conocer sus dimensiones, por lo que algunos equipos dependiendo de la capacidad a tratar, se cotizaron con diferentes empresas, en el caso de unos cuantos equipos se pudo obtener sus dimensiones a partir del simulador Aspen Plus, mientras que en otros casos se utilizaron ecuaciones de diseño. Para calcular los costos de los equipos la jerarquía para obtener el precio será la siguiente:

- Cotización con empresas de acuerdo con las capacidades requeridas.

- Escalamiento de costos, de un equipo cotizado más pequeño a uno mayor, donde la fórmula de escalamiento se muestra en la siguiente ecuación (Peters & Timmerhaus, 2003).

$$Cost_2 = \left(\frac{capacidad2}{capacidad1} \right)^m cost_1 \quad (5)$$

- Estimación de costos a partir de gráficas o correlaciones de costos (Peters et al., 2003; Seider, Seader, & Lewin, 2009).
Finalmente se realizó el análisis beneficio/costo como se describió anteriormente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se analizan y discuten los resultados de la investigación. La primera parte trata acerca de la biomasa disponible en el país para obtener biodiesel a corto y mediano plazo, seguido de los resultados obtenidos en el ACV y finalmente el análisis beneficio/costo.

Biomasa disponible para obtener biodiesel en México

De una búsqueda bibliográfica y en internet, se encontraron referencias a 59 empresas en el país, de las cuales Purolite de México es únicamente distribuidor de biodiesel. Empresas como Biofuels, Reoil, Biodiesel Moreco y SOLBEN recolectan aceite de cocina usado y producen biodiesel. Éstas son de las de mayor interés en el país puesto que se conoce que están operando actualmente. El resto de las empresas se desconoce si operan actualmente, si ya han cerrado o si están próximas a completarse. En el Anexo I se observa el directorio de empresas encontradas.

Materia prima disponible para obtener biodiesel a partir de palma de aceite

Hasta el año 2016, México contaba con 90,118 ha de plantaciones de palma aceitera en los estados de Chiapas, Campeche, Veracruz y Tabasco (SIAP,2015). La producción total hasta ese momento cubría únicamente el 15.6% del consumo nacional de aceite (COMEXPALMA).

Un estudio elaborado por la SAGARPA e INIFAP (SAGARPA-INIFAP, 2012) determinó que México cuenta con 1,810,362 ha para establecer cultivos de palma en los estados mencionados anteriormente, según la distribución mostrada en la Figura 8. En este trabajo se consideró que a partir del año 2016 (año en que se inició el estudio) se comenzarían a establecer plantaciones nuevas.

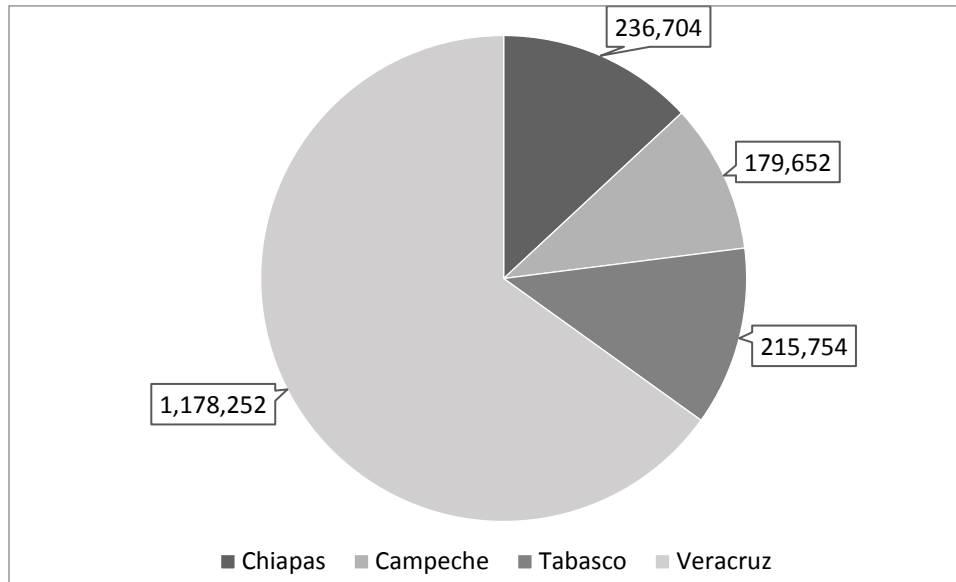


Figura 8 Superficie disponible en hectáreas en México para plantaciones de palma aceitera

Para estimar la superficie que es posible dedicar para producir biodiesel, se hicieron proyecciones de crecimiento entre los años 2016 y 2040, usando los siguientes criterios:

- 1) en este periodo se plantará la superficie total disponible (1,810,362 ha) siguiendo un crecimiento proporcional durante los 23 años del periodo, lo que equivale a establecer cada año 75,432 ha nuevas de 2016 a 2040.
- 2) las plantaciones nuevas de palma aceitera deberán primeramente cubrir la demanda nacional de aceite de palma y el excedente podría dirigirse a la producción de biodiesel, considerando que la demanda de aceite de palma para la industria alimentaria seguirá creciendo linealmente como en los últimos 5 años. En la Figura 9 se observa la demanda nacional de aceite de palma de 2000 hasta 2016 (COMEXPALMA). La tendencia de crecimiento es bastante lineal a partir de 2012. Siguiendo esta tasa de crecimiento, se proyectó el crecimiento de la demanda de aceite de palma hasta el 2040.

En la Figura 9 se observa la demanda histórica de aceite y la proyectada.

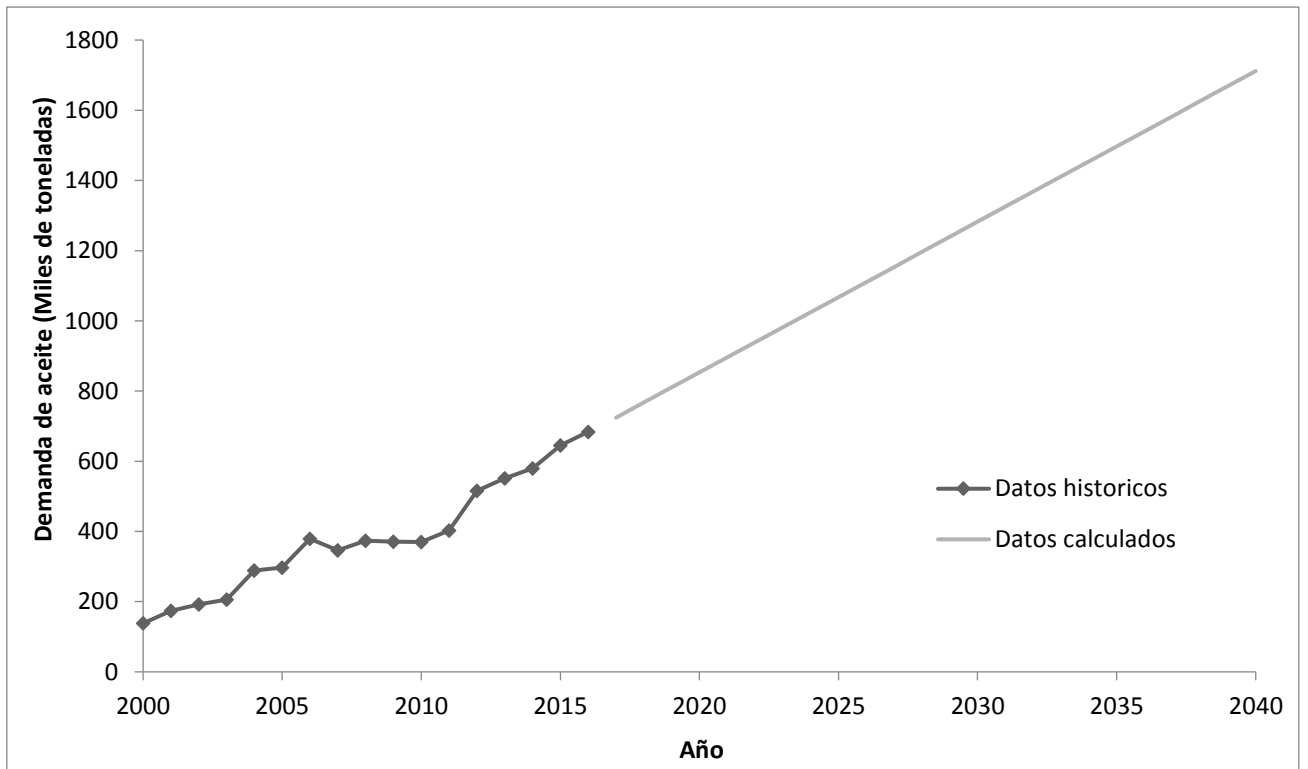


Figura 9 Demanda histórica y proyectada del consumo nacional de aceite de palma

- 3) de acuerdo al primer criterio mencionado, se busca el punto de corte entre el crecimiento lineal propuesto de las plantaciones y el requerido para satisfacer la demanda nacional (Figura 9). Utilizando las productividades promedio por estado (Anexo II) y utilizando como factor de ponderación el porcentaje de superficie disponible para nuevas plantaciones (Figura 10), se calculó una productividad promedio de aceite de 2.0 t/ha para todo el país. Para cubrir la demanda nacional creciente de aceite de palma sin recurrir a importaciones se requieren 508,482 ha de plantaciones nuevas. De esta manera, se observa que es a partir del 2018 que se comienza a tener excedentes de aceite.

En la Figura 10 se observa la superficie disponible para palma aceitera para la producción de biodiesel y alimento.

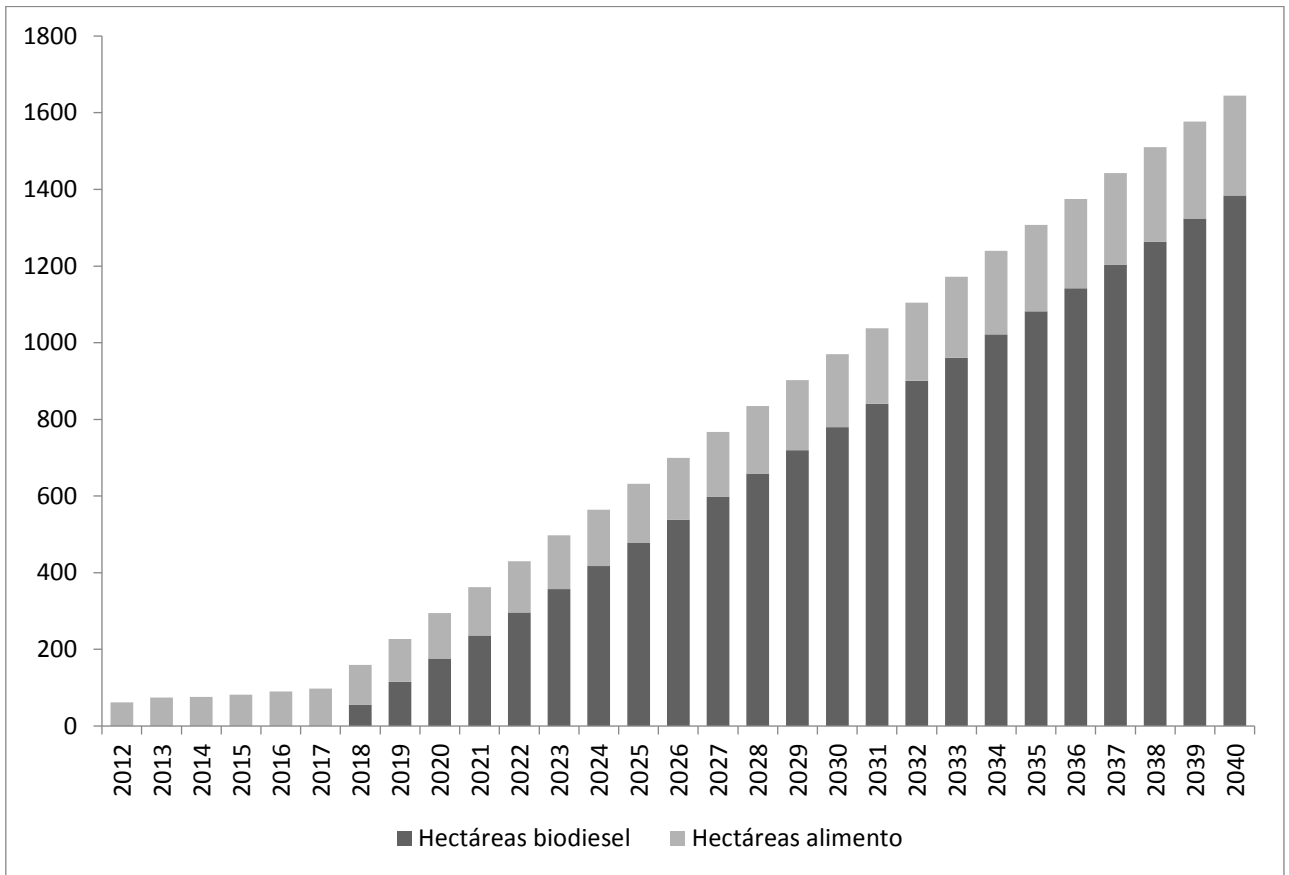


Figura 10. Superficie disponible para plantaciones de palma aceitera para biodiesel y alimento.

Esta proyección resulta en que es posible contar con 1,384,030 ha para la producción de biodiesel, si se establecen 75,432 ha anuales desde 2016 a 2040.

En la Figura 11 se muestra la progresión de establecimiento de plantaciones para biodiesel en el periodo mencionado. Conservando la proporción de superficie disponible en cada estado, las plantaciones se distribuirían en 2040 de la siguiente manera: 180,961 ha en Chiapas, 137,345 ha en Campeche, 164,945 ha en Tabasco y 900,779 ha en Veracruz.

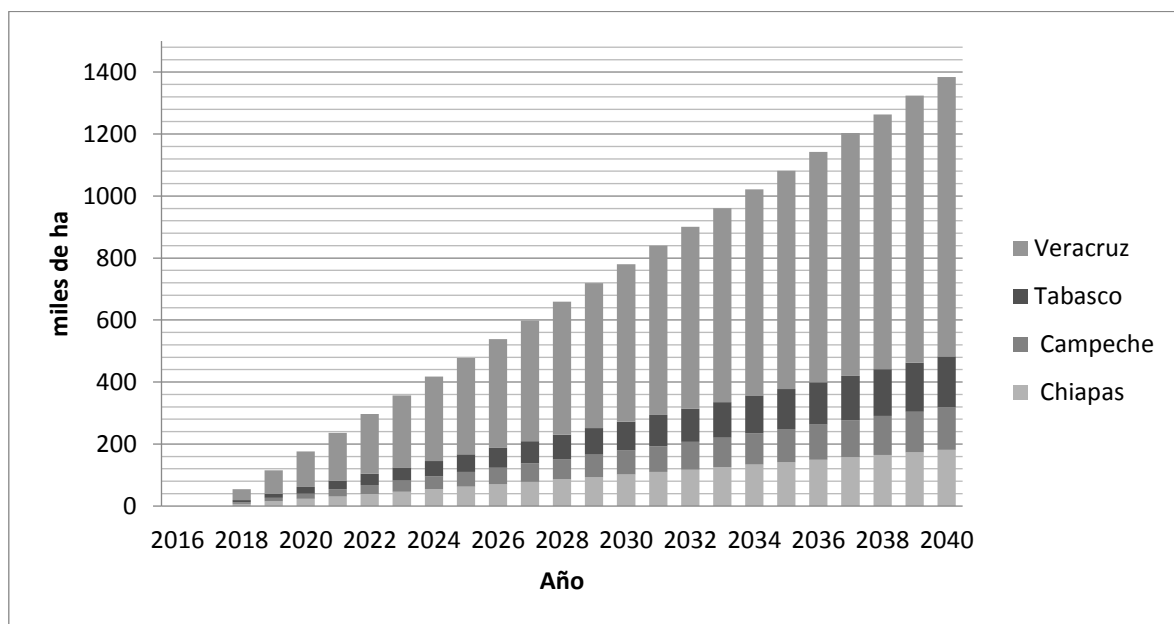


Figura 11 Crecimiento proyectado de superficie para plantaciones de palma aceitera para biodiesel por estado

Con estas proyecciones, se determinó la cantidad de biodiesel producido en metros cúbicos durante el periodo 2018-2040, como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8 Producción de biodiesel de aceite de palma proyectada (metros cúbicos)

Año	Chiapas	Campeche	Tabasco	Veracruz	Total (m³)
2018	2.05E+07	7.68E+06	1.21E+07	5.66E+07	9.69E+07
2019	4.30E+07	1.61E+07	2.54E+07	1.19E+08	2.04E+08
2020	6.56E+07	2.46E+07	3.87E+07	1.81E+08	3.10E+08
2021	8.81E+07	3.30E+07	5.21E+07	2.44E+08	4.17E+08
2022	1.11E+08	4.15E+07	6.54E+07	3.06E+08	5.23E+08
2023	1.33E+08	4.99E+07	7.87E+07	3.68E+08	6.30E+08
2024	1.56E+08	5.84E+07	9.20E+07	4.30E+08	7.37E+08
2025	1.78E+08	6.68E+07	1.05E+08	4.93E+08	8.43E+08
2026	2.01E+08	7.53E+07	1.19E+08	5.55E+08	9.50E+08
2027	2.23E+08	8.37E+07	1.32E+08	6.17E+08	1.06E+09
2028	2.46E+08	9.22E+07	1.45E+08	6.80E+08	1.16E+09
2029	2.69E+08	1.01E+08	1.59E+08	7.42E+08	1.27E+09
2030	2.91E+08	1.09E+08	1.72E+08	8.04E+08	1.38E+09
2031	3.14E+08	1.18E+08	1.85E+08	8.67E+08	1.48E+09

2032	3.36E+08	1.26E+08	1.99E+08	9.29E+08	1.59E+09
2033	3.59E+08	1.34E+08	2.12E+08	9.91E+08	1.70E+09
2034	3.81E+08	1.43E+08	2.25E+08	1.05E+09	1.80E+09
2035	4.04E+08	1.51E+08	2.39E+08	1.12E+09	1.91E+09
2036	4.26E+08	1.60E+08	2.52E+08	1.18E+09	2.02E+09
2037	4.49E+08	1.68E+08	2.65E+08	1.24E+09	2.12E+09
2038	4.72E+08	1.77E+08	2.79E+08	1.30E+09	2.23E+09
2039	4.94E+08	1.85E+08	2.92E+08	1.36E+09	2.34E+09
2040	5.17E+08	1.94E+08	3.05E+08	1.43E+09	2.44E+09

Con estos valores, el promedio anual de producción de biodiesel es de 1,508,494 m³. Con estas producciones es posible satisfacer el 3.63% de la demanda interna del país durante el año 2030 (587.1 miles de barriles diarios), satisfaciendo el 11.96% de las importaciones durante el 2030 (146.4 miles de barriles diarios). Se podría establecer cinco empresas en cuatro estados de la república, Chiapas, Campeche, Tabasco y Veracruz (dos establecidas en Veracruz).

Materia prima disponible para obtener biodiesel a partir de ACU.

Se realizaron proyecciones para estimar la cantidad de ACU disponible en el país. México cuenta con 59 zonas metropolitanas donde se podrían obtener de 208 a 288 miles de metros cúbicos de aceite en 2016. Utilizando los valores de las estimaciones baja y alta explicados en la metodología, en la Figura 12 se muestra la recuperación potencial de ACU calculada en las 59 zonas metropolitanas del país, en el periodo comprendido de 2016 a 2040 (25 años). En la Figura 12 se observa las zonas metropolitanas del país. .

Zonas metropolitanas de la República Mexicana

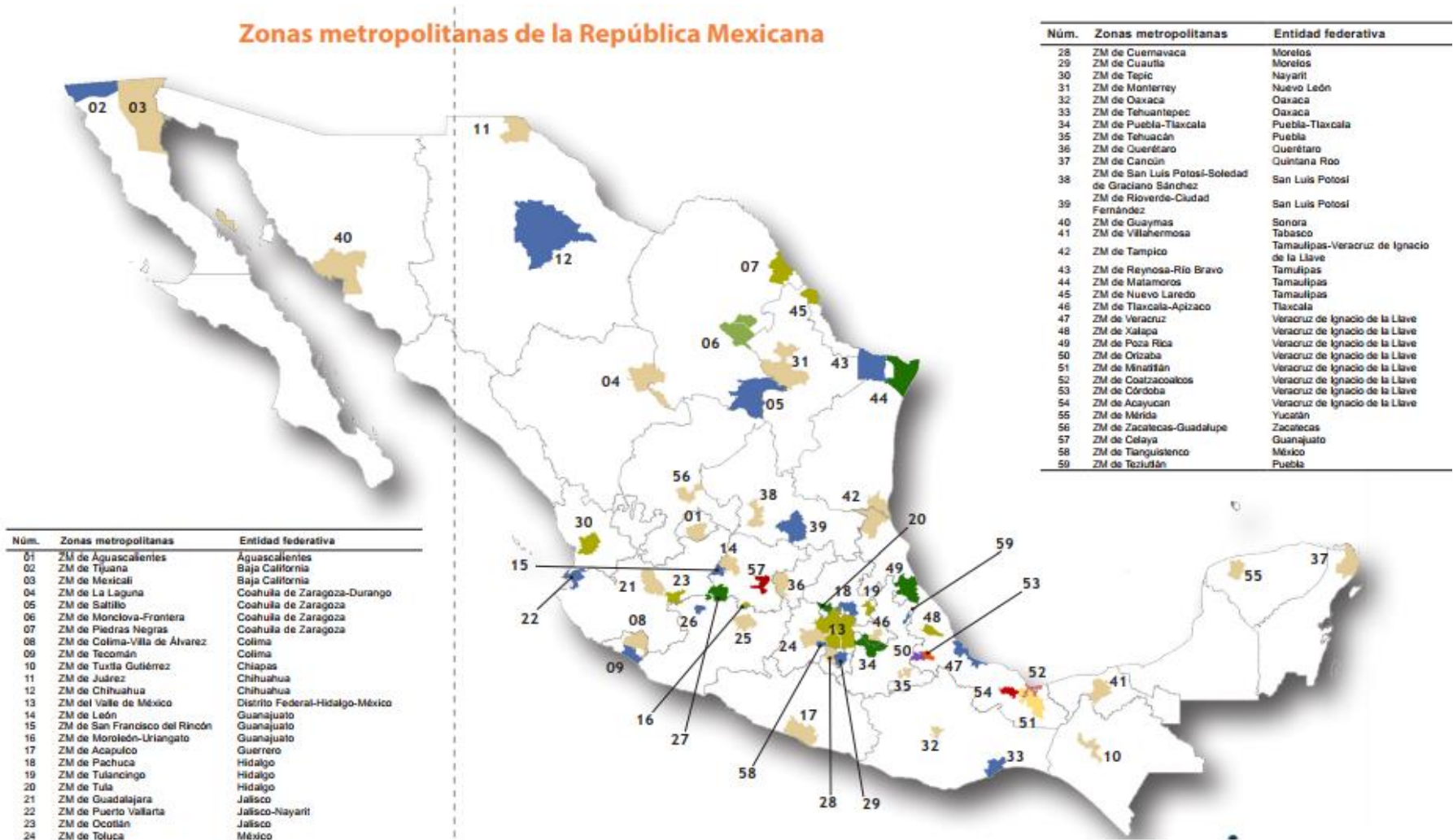


Figura 12 Mapa de las zonas metropolitanas de México (INEGI, 2010)

La recolección en todas las zonas metropolitanas representaría retos logísticos y de economía de escala, sobre todo para las más pequeñas. Tomando en cuenta que en 15 zonas metropolitanas se agrupa el 70.71% del total de personas en zonas metropolitanas (y por lo tanto del aceite recolectable), se calculó el aceite recuperable disponible. En la Tabla 9 se observa el aceite recuperable del periodo comprendido del 2016 al 2040 en las 59 zonas metropolitanas, así como en 15 zonas metropolitanas más grandes.

Tabla 9 ACU recuperado en miles de m³ anuales

	2016	2020	2025	2030	2035	2040
En las 59 zonas metropolitanas	208-288	226-294	242-302	259-309	278-317	298-325
En las 15 zonas metropolitanas	147-204	160-208	171-213	183-219	197-224	211-230

Haciendo un promedio anual de estas producciones y separando por zona metropolitana, se obtienen las estimaciones con ambos métodos reportados en la Tabla 10.

Tabla 10 Estimación de ACU recolectado (en m³ anuales) en las 15 zonas metropolitanas con mayor producción en México, para el periodo 2016-2040.

Zona metropolitana	Estimación baja	Estimación alta
ZM del Valle de México	77906	96575
ZM de Guadalajara	17175	21291
ZM de Monterrey	15901	19712
ZM de Puebla-Tlaxcala	10568	13100
ZM de Toluca	7498	9295
ZM de Tijuana	6783	8408
ZM de León	6233	7727
ZM de Juárez	5159	6395
ZM de la Laguna	4708	5837
ZM de Querétaro	4248	5267

Zona metropolitana	Estimación baja	Estimación alta
ZM de San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez	4029	4995
ZM de Mérida	3768	4671
ZM de Mexicali	3628	4497
ZM de Aguascalientes	3611	4476
ZM de Cuernavaca	3582	4441
TOTAL	174,798	216,687

De acuerdo con la Tabla 10 es posible recolectar anualmente entre 174.8 y 216.7 miles de m³ de ACU, durante el periodo comprendido del 2016 al 2040. Para fines de este estudio, la base de cálculo se fijó como el promedio de estos valores, que es de 195,742 m³ anuales lo que resulta en producciones anuales de 175,946 m³ de biodiesel. Con estas producciones es posible satisfacer el 0.46% de la demanda interna del país durante el año 2030 (587.1 miles de barriles diarios), satisfaciendo el 1.50% de las importaciones durante el 2030 (146.4 miles de barriles diarios). De acuerdo con estas producciones es posible establecer empresas con capacidades diferentes de biodiesel que procesen el aceite recolectado en las 15 zonas metropolitanas identificadas. En la Tabla 11 se resume el área ocupada por zona metropolitana y una aproximación de la capacidad de las empresas que se podrían establecer.

Tabla 11 Kilómetros abarcados por zonas metropolitanas y capacidad de producción

Zona metropolitana	Entidades federativas	km ²	Capacidad de producción m ³ /día	Número de empresas establecidas
ZM del Valle de México	Distrito Federal-Hidalgo-México	7866.1	238	4
ZM de Guadalajara	Jalisco	2727.5	52	1
ZM de Monterrey	Nuevo León	6794	49	1
ZM de Puebla-Tlaxcala	Puebla-Tlaxcala	2392.4	32	1
ZM de Toluca	México	2203.2	23	1
ZM de Tijuana	Baja california	4422.7	21	1
ZM de León	Guanajuato	1760.1	19	1
ZM de Juárez	Chihuahua	3547.5	16	1
ZM de la Laguna	Coahuila de Zaragoza-Durango	5078.9	14	1
ZM de Querétaro	Querétaro	2053.4	13	2
ZM de San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez	San Luis Potosí	1787.7	12	2
ZM de Mérida	Yucatán	1528.9	12	2

ZM de Mexicali	Baja california	15654.1	11	2
ZM de Aguascalientes	Aguascalientes	1822.3	11	1
ZM de Cuernavaca	Morelos	1189.9	11	1

Considerando que la distancia entre los sitios de recolección y la planta de biodiesel no supere los 200 km de diámetro, se obtienen 22 empresas con capacidades diferentes en 15 zonas metropolitanas del país, como se observa en la Figura 13.



Figura 13 Empresas productoras de biodiesel a partir de ACU

En la Figura 14 se puede apreciar la zona del centro del país.

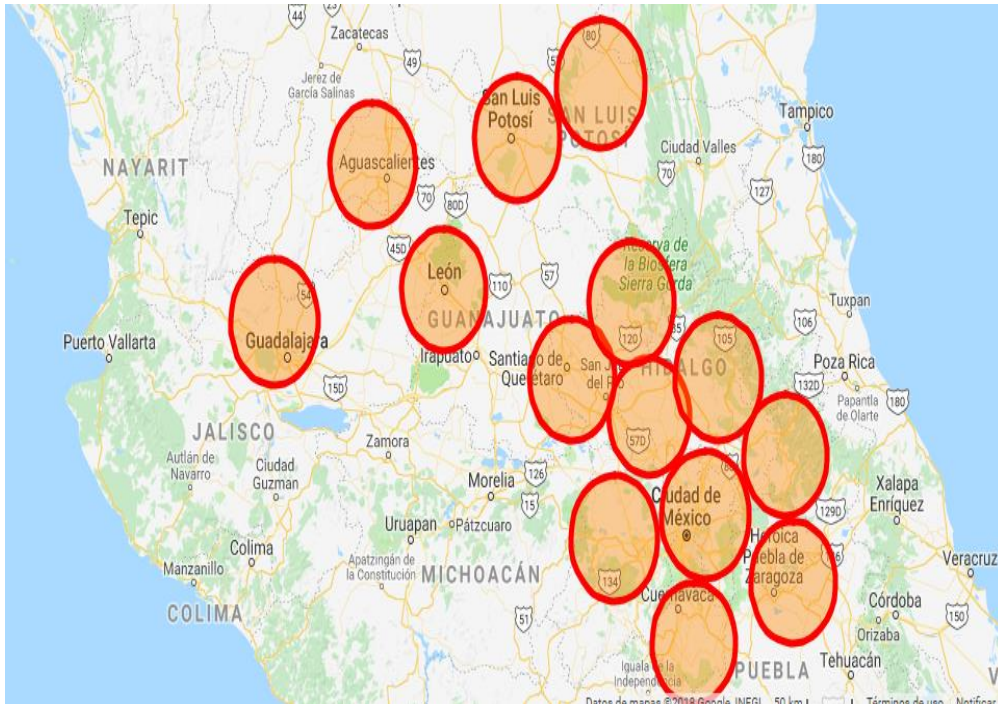


Figura 14 Empresas productoras de biodiesel a partir de ACU (centro del país)

En la Figura 14 se observan las empresas establecidas en 15 zonas metropolitanas y sus

Materia prima disponible para obtener biodiesel a partir de glicerina cruda y levaduras

En el caso del uso de levaduras se consideró la glicerina cruda obtenida en las proyecciones descritas anteriormente como se observa en la Tabla 12. La relación derivada de los balances de masa de las rutas tecnológicas anteriores es de 0.08 m³ de glicerina cruda por cada m³ de biodiesel producido.

Tabla 12 Glicerina cruda disponible como sustrato

Año	Glicerina ACU (m ³)	Glicerina palma (m ³)
2016	1.58E+04	
2017	1.59E+04	
2018	1.61E+04	7.48E+03
2019	1.62E+04	1.57E+04

2020	1.64E+04	2.39E+04
2021	1.65E+04	3.22E+04
2022	1.67E+04	4.04E+04
2023	1.68E+04	4.86E+04
2024	1.70E+04	5.69E+04
2025	1.71E+04	6.51E+04
2026	1.73E+04	7.34E+04
2027	1.74E+04	8.16E+04
2028	1.76E+04	8.98E+04
2029	1.77E+04	9.81E+04
2030	1.79E+04	1.06E+05
2031	1.81E+04	1.15E+05
2032	1.82E+04	1.23E+05
2033	1.84E+04	1.31E+05
2034	1.85E+04	1.39E+05
2035	1.87E+04	1.47E+05
2036	1.89E+04	1.56E+05
2037	1.91E+04	1.64E+05
2038	1.92E+04	1.72E+05
2039	1.94E+04	1.80E+05
2040	1.96E+04	1.89E+05
Total	4.40E+05	2.26E+06

De acuerdo con la Tabla 12 es posible obtener en promedio cada año 107,824 m³ de glicerina cruda, durante el periodo comprendido del 2016 al 2040, lo que resulta en producciones anuales de 21,996 m³ de biodiesel. Esto representa un incremento de 1.3% adicional en la producción de biodiesel de las otras rutas tecnológicas.

Cabe mencionar que con el uso de glicerina cruda y levaduras para producir biodiesel es posible satisfacer el 0.06% de la demanda interna del país durante el año 2030 (587.1 miles de barriles diarios), que equivale al 0.19% de las importaciones (146.4 miles de barriles diarios).

Sin embargo, puesto que las empresas actualmente establecidas en el país, así como la tecnología existente para la producción de biodiesel cuenta con una capacidad de 400 a 8000 l diarios, en lotes, la glicerina cruda obtenida por cada empresa constituye una cantidad pequeña para el desarrollo de empresas que produzcan únicamente biodiesel a partir de levaduras (producción diaria de 105 l de biodiesel diarios para empresas que cuentan con una capacidad diaria de 8000 l), por lo que se considera la reutilización de la glicerina cruda en las plantas industriales que producen biodiesel a partir de ACU y aceite de palma aumentando la producción de biodiesel un 1.3% en cada planta establecida.

Descripción de las rutas tecnológicas

En esta sección se describe los límites del sistema de cada ruta tecnológica para la elaboración del ACV, se contemplaron la etapa agronómica (únicamente en el caso del biodiesel a partir de aceite de palma), el transporte hasta la planta industrial, la etapa industrial del sistema y la distribución y uso de los productos finales, así como la gestión de residuos generados en todas las etapas. Se excluye la etapa de uso de la glicerina cruda en todas las rutas tecnológicas, debido a que es un producto con la misma composición química que el producto de referencia, y por lo tanto la etapa de uso en ambos sistemas tendrá las mismas emisiones. Lo mismo aplica para el procesamiento, distribución, uso y gestión de residuos del aceite de palmiste y harina de palmiste (únicamente en el caso del biodiesel a partir de aceite de palma). También se dejan fuera las etapas de manufactura de equipamiento y su desmantelamiento debido a que en general estos impactos no son relevantes para sistemas de bioenergía. De igual manera se describen los procesos que integran cada ruta tecnológica.

Ruta tecnológica de primera generación (aceite de palma)

La ruta tecnológica de primera generación consiste en: el procesamiento de 7,158,865 t de racimos de frutas fresca de palma para producir anualmente 1,508,494 m³ de biodiesel, 158,912 t de glicerina cruda, 22,191 t de sulfato de potasio (como biofertilizante), 342,365 t de aceite de palmiste y 489,093 t de forraje.

Los límites del sistema para realizar el ACV incluyen la etapa agronómica, el transporte hasta la planta industrial, la etapa industrial del sistema y la distribución y uso de los productos finales, así como la gestión de residuos (agua residual y sólidos).

Cabe mencionar que toda la tecnología para producir biodiesel a partir de aceites ya está probada e implementada a escala comercial, principalmente utilizando plantas industriales de fabricación nacional con capacidad de producción de entre 400 y 8,000 L de biodiesel diarios. Actualmente México no cuenta con establecimientos que produzcan biodiesel a partir de aceite de palma.

A partir de la Figura 15 se describen los procesos que integran la ruta tecnológica del escenario propuesto (biodiesel a partir de aceite de palma), considerando cinco etapas: agronómica, transporte, industrial, gestión de residuos y distribución y uso.

Etapa agronómica: Se asume la plantación requiere 3 años para establecerse, de manera que a partir del año 4 y durante 22 años (es decir, hasta el año 25) alcanza y mantiene su productividad anual máxima de 15.01 t·ha⁻¹ en Chiapas, 7.41 t·ha⁻¹ en Campeche, 9.73 t·ha⁻¹ en Tabasco y 8.33 t·ha⁻¹ Veracruz (Anexo II). Para estimar la superficie que es posible plantar con palma aceitera para producir biodiesel, se hicieron proyecciones de crecimiento entre los años 2016 y 2040, usando los siguientes criterios: 1)

en este periodo, se plantará la superficie total disponible para plantaciones nuevas de palma aceitera, la cual se concentra en los estados de Tabasco, Chiapas, Campeche y Veracruz, y es de un total de 1,810,362 ha (Sagarpa-Inifap, 2012); 2) las plantaciones nuevas de palma aceitera deberán primeramente cubrir la demanda nacional de aceite de palma y el excedente podría dirigirse a la producción de biodiesel, considerando que la demanda de aceite de palma para la industria alimentaria seguirá creciendo linealmente como en los últimos 5 años. De ahí resulta que la superficie que podría plantarse para producción de biodiesel es de 1,384,030 ha hasta el año 2040.

El cálculo de las emisiones por cambio de uso de suelo directo (CUSd) se realizó con la metodología recomendada por la Roundtable of Sustainable Biomateriales, usando el calculador publicado por Blonk Consultants (Blonkconsultants,) y con las siguientes suposiciones: las plantaciones de palma aceitera que se establecerán en regiones con clima cálido húmedo en Chiapas y Tabasco, y clima cálido sub-húmedo en Campeche y Veracruz (INEGI) se modelan todas como en clima “tropical húmedo”; las plantaciones reemplazarían pastizales manejados en todos los casos (Garcia, Riegelhaupt, & Masera, 2013; Sagarpa-Inifap, 2012); se asume sembrado con labranza alta (las plantaciones de Tabasco usan retroexcavadoras, se asumió lo mismo para los otros estados) y cosecha manual (por lo que el manejo del cultivo es bajo) (CONAGUA-SEMARNAT; Inifap-Sagarpa, 2011). Los datos de insumos en esta etapa se recabaron a partir de paquetes tecnológicos y para el caso de plantaciones en Tabasco, de datos primarios (Anexo III).

Los límites del sistema se observan en la Figura 15.

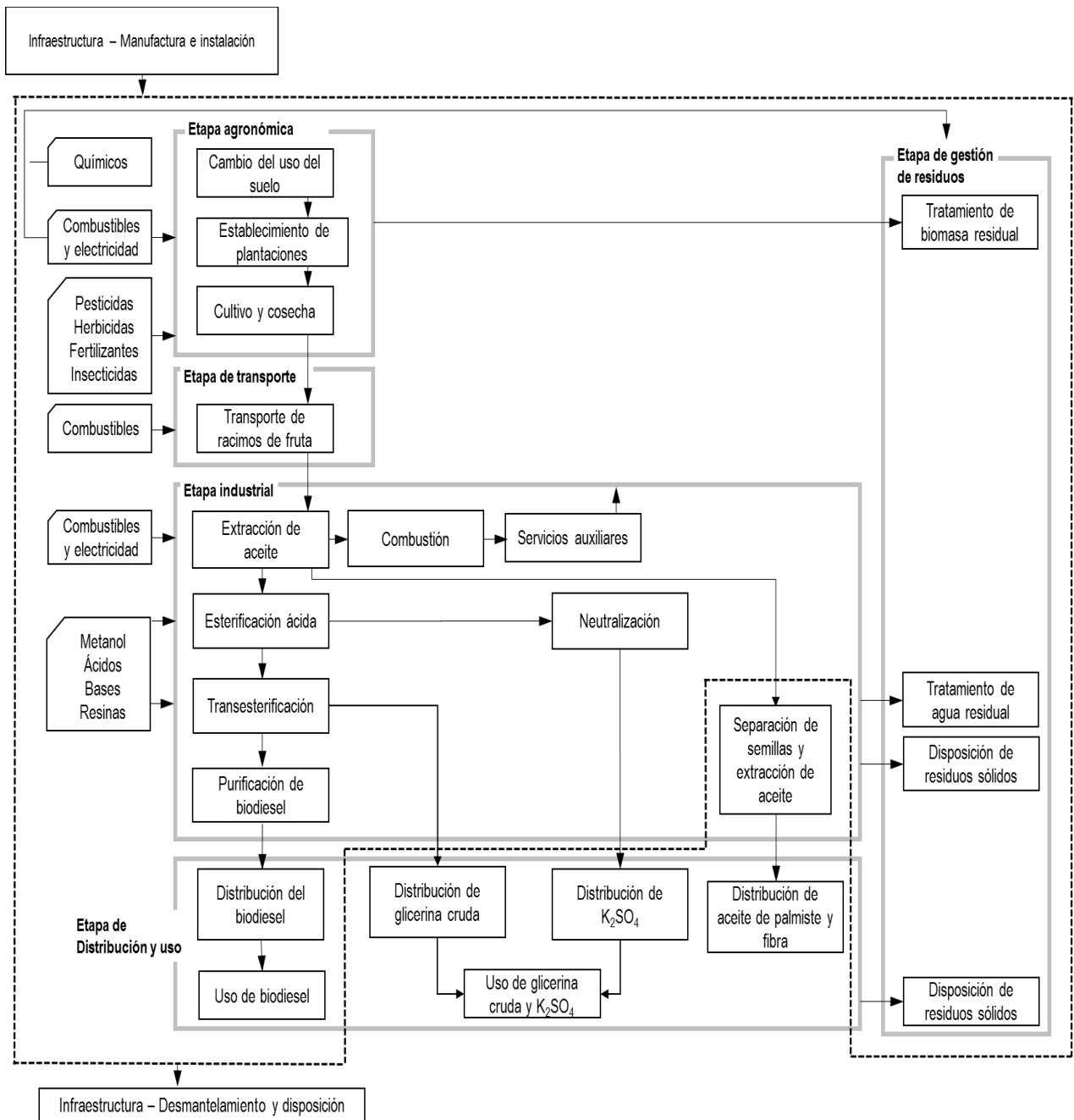


Figura 15 Límites del sistema para la producción de biodiesel a partir de aceite de palma

Transporte: Al ser un sistema de bioenergía nuevo, se considera la ubicación de la planta industrial cerca de los terrenos de las plantaciones, por lo que la distancia promedio a recorrer por los camiones se supone de 8.07 km (distancia media entre plantaciones en Tabasco y los molinos de fruto de palma), en camiones con capacidad de carga entre 7.5 a 16 t con tecnología de tipo EURO3 (motores fabricados entre 2002 y 2008).

Etapa industrial: Se consideró que la distribución de la biomasa se considera como sigue: Del racimo de fruto fresca se obtiene un 23% de racimo de frutos vacío, 21% de aceite palma, 7% de semilla, 15% de fibra y un 7% de cascarilla (Husain, Zainac, & Abdullah, 2002). Para la extracción de aceite se consideró la Figura 16 y en la Tabla 13 se describen los equipos de proceso usados para simular la extracción del aceite de palma.

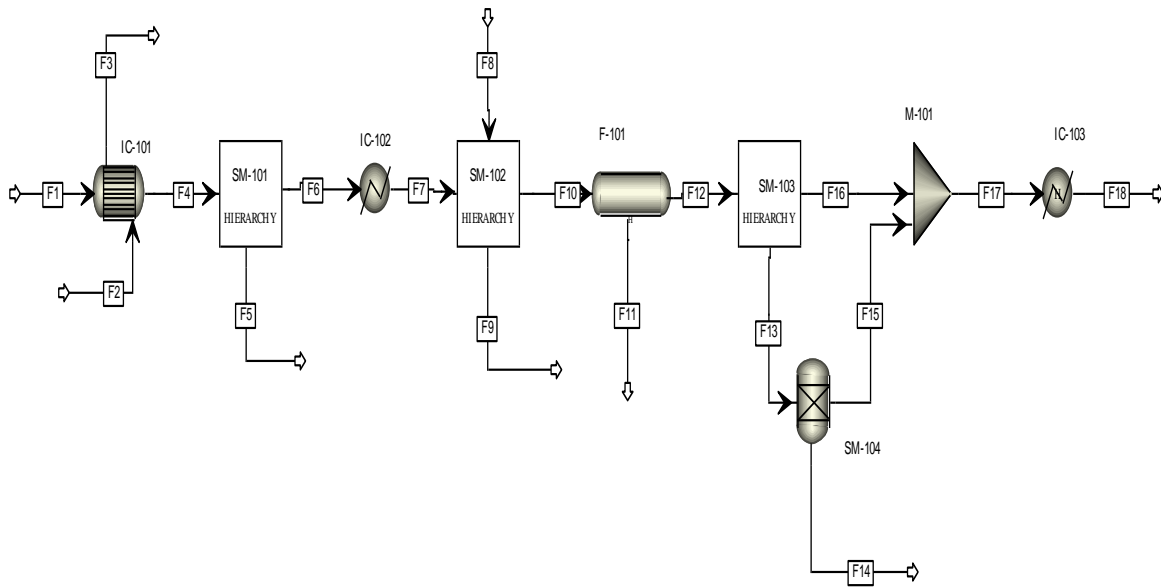


Figura 16 Diagrama de flujo de proceso para la extracción de aceite de palma

Tabla 13 Descripción de los equipos de proceso en la extracción de aceite de palma

Equipo	Descripción
IC-101	Esterilizador
SM-101	Tambor desfrutador de semillas
IC-102	Macerado de semillas
SM-102	Prensa de tornillo sin fin
F-101	Decantador
SM-103	Clarificador
M-101	Mezclador
SM-104	Centrifuga
IC-103	Secador

El procesamiento se consideró usando parámetros de operación de la literatura y simulaciones en Aspen Plus, para estimar las emisiones resultantes. Al proceso donde los

racimos de fruta fresca se calientan se le llama esterilización y tiene como objetivo desactivar las enzimas hidrolíticas responsables de que el aceite se rompa en ácidos grasos libres en el fruto, este proceso se lleva cabo utilizando vapor a 140°C (F2) durante un periodo de 90 min en una autoclave (IC-101) a 3x10⁵ pascales (Igwe & Onyegbado, 2007; Rupani, Singh, Ibrahim, & Esa;), cabe mencionar que el condensado resultante en esta etapa es un residuo, que posteriormente se dispone en lagunas de tratamientos aguas residuales, este residuo equivale a un 5% de los racimos de fruta fresca (Yusoff, 2006), se separa el fruto de los racimos utilizando un tambor desfrutador (SM-101), los racimos de fruta vacía se consideró que se depositarán en tiraderos a cielo abierto. Posteriormente, los frutos son macerados en un tanque (IC-102) a 90°C hasta formar una masa homogénea de la cual se extrae el aceite mediante prensas de tornillo sin fin (SM-102). Obteniendo aceite (F10) y una torta residual de semillas, es necesario agregar agua (F8) para facilitar la salida del aceite del prensado por lo general a 90°C a 130 bares en una relación de dilución 1.4% aceite y agua (CUE, 2012).

Con respecto a la torta residual obtenida se procede a obtener el aceite de palmiste (se encuentra en el interior de la semilla). Este proceso consiste en usar un ciclón para realizar la separación de las semillas y la fibra, posteriormente se rompen las semillas para separar los granos de la cáscara y finalmente los granos se someten a una molienda o prensado para la extracción del aceite de palmiste y un residuo de torta de almendra que sirve de alimento para animales (forraje). Cabe mencionar que durante esta etapa se obtiene un 5% con respecto al peso de los racimos de fruta seca de aguas residuales, que se dirigirán a una laguna de tratamiento de aguas residuales (CUE, 2012; Gutiérrez, Sánchez, & Cardona, 2009; Yusoff, 2006).

El aceite obtenido a partir del proceso de extracción mecánica es filtrado (F-101) y posteriormente clarificado (SM-103) a través de una separación gravimétrica, la cual se base en la diferencia de densidades la temperatura del medio tiene que ser de 90-95°C. El aceite crudo se deshidrata (IC-103) para disminuir la humedad (menor del 1%), posteriormente el aceite es almacenado y utilizado posterior mente para la producción de biodiesel. Durante el proceso de clarificado se obtiene agua contaminada con aceite como subproducto. El agua contaminada contiene residuos de aceite, para recuperar el aceite se pasa por una centrifuga (SM-104). El agua contaminada tiene que ser sometida a un tratamiento de efluentes (esta agua proviene de la etapa de esterilización y clarificado), generalmente consiste en lagunas facultativas, este tratamiento permite una disminución drástica de la DQO, tiene la desventaja de emitir gas metano (CUE, 2012).

En la Tabla 14 se observan las consideraciones tomadas para realizar la extracción del aceite de palma en el simulador Aspen Plus.

Tabla 14 Consideraciones adicionales utilizadas en el Simulador para la extracción del aceite de palma

Equipo	Datos de entrada	Bloque de simulación utilizado	Equipo	Datos de entrada	Bloque de simulación utilizado
IC-101	Presión 1 atm Temperatura de salida corriente fría: 40°C	HeatX modelo termodinámico UNIFAC	SM-103	Clarificado: su eficiencia es de un 88%. El aceite a la salida contiene 4% de impurezas	Hierachy modelo termodinámico UNIFAC
SM-101	Remocion de la semilla del fruto usando el dato de la Tabla 2. Racimos de fruta fresca.	SEP modelo termodinámico UNIFAC	SM-104	Centrifuga: se recupera todo el aceite de palma	Hierachy modelo termodinámico UNIFAC
IC-102	Presión 1 atm Temperatura: 90°C	Heater modelo termodinámico UNIFAC	M-101	Presion: 1 atm T: 25°C	Mixer modelo termodinámico UNIFAC
SM-102	Prensa de tornillo sin Fín se obtiene un 70% del aceite	Hierachy Modelo termodinámico: UNIFAC	IC-103	Deshidrata el aceite hasta reducir la humedad a 1%	Hierachy Modelo termodinámico: UNIFAC
F-101	Filtro elimina una porción de los sólidos presentes en el aceite (85%)	DECANTER modelo termodinámico UNIFAC			

La composición química del aceite se estimó a partir del perfil de ácidos grasos del aceite con la metodología de la composición más probable de Hayakawa (1967). El perfil de ácidos grasos considerado se muestra en la Tabla 15. Para este trabajo se consideró

sumar las contribuciones de los ácidos laurico y palmitoleico a la concentración de ácido oleico, puesto que sólo representan un 0.3% y no se tienen las propiedades fisicoquímicas para obtener resultados adecuados en el simulador, por lo que el simulador no reconoce estos compuestos.

Tabla 15 Perfil de ácidos grasos de aceite de palma

Ácido graso	Composición (%)
Mirístico	1.0
Palmitico	39.7
Esteárico	4.3
Oleico	46.1
Linoleico	8.5
Linolénico	0.2

La composición química del aceite de palma se estimó con el método de Hayakawa (1967). El perfil de ácidos grasos considerado se detalla en la Tabla 16.

Tabla 16 Composición de aceite de palma

Ácido grasos	Composición	Ácido grasos	Composición	Ácido grasos	Composición
Ac. Linolenico	0.25	POM	2,17	LIOO	0.61
Ac.linoleico	0.13	PLIM	0.14	OLILI	0.04
Ac. Estearico	0.01	SOS	0.41	MOO	0.75
Ac. Oleico	4.38	SLIS	0.03	OLIM	0.05
POP	39.85	SOO	2.81	LIOLI	0.02
PLIP	2.53	SLIO	0.18	LILILI	0.00
POS	8.11	SOLI	0.18	LIOM	0.05
PLIS	0.51	SLILI	0.01	MLILI	0.00
POO	27.68	SOM	0.22	MOM	0.03
PLIO	1.76	SLIM	0.01	MLIM	0.00
POLI	1.76	OOO	4.80	Agua	0.10
PLILI	0.11	OLIO	0.30		

El aceite obtenido (F18) se somete a un proceso de esterificación ácida (R-101) puesto que la cantidad de ácidos grasos libres presentes en el aceite es superior a 3%, en lotes obteniendo 8000 L diarios, los resultados de la simulación se encuentran en el Anexo IV.

En la Figura 17 se observa el diseño de proceso para llevar a cabo los inventarios.

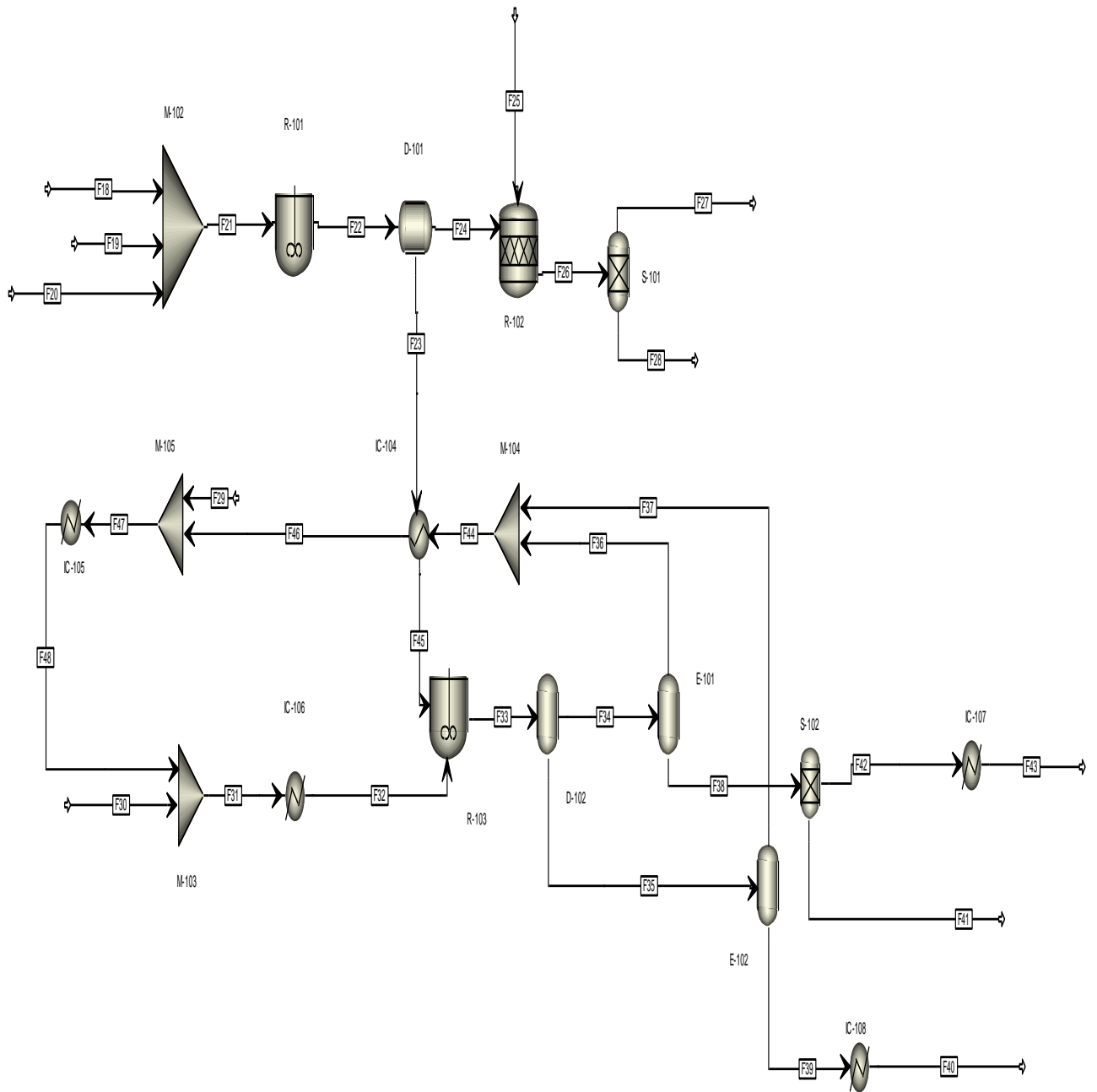


Figura 17 Diagrama de flujo de proceso para la producción de biodiesel a partir de palma de aceite

En la Tabla 17 se describen los equipos usados.

Tabla 17 Descripción de los equipos de proceso en la producción de biodiesel a partir de aceite de palma

Equipo	Descripción	Equipo	Descripción	Equipo	Descripción
M-101	Mezclador	D-101	Decantador	M-104	Mezclador
IC-104	Intercambiador de calor	R-102	Reactor	R-101	Reactor agitado continuo
IC-105	Intercambiador de calor	S-102	Separador	D-102	Decantador
RF-101	Fermentador	IC-107	Intercambiador de calor	S-103	Columna de resinas poliméricas
IC-103	Intercambiador de calor	M-105	Mezclador	E-102	Evaporador
S-101	Separador (centrifuga)	R-103	Reactor agitado continuo		
IC-106	Intercambiador de calor	IC-108	Intercambiador de calor		

La reacción de esterificación se realiza cuando el metanol (F19) reacciona con el aceite en un 10% p·p⁻¹ (relación 13:1 molar), usando ácido sulfúrico (F20) como catalizador en una relación 1% p·p⁻¹ con respecto al aceite obtenido (en el Anexo V se observa las cinéticas de reacción. Las fases resultantes de esta reacción se separan por decantación (D-101) (Comunicación personal). Una de las fases contiene triglicéridos y biodiesel obtenidos, a partir de la cual se realiza la reacción de transesterificación. La corriente compuesta mayormente por metanol y H₂SO₄, se neutraliza usando KOH (F25) a 50°C. Para recuperar las sales (K₂SO₄, F28) se usa un filtro (S-101) (Zhang, Dube, McLean, & Kates, 2003).

Para realizar la reacción de transesterificación los triglicéridos reaccionan con metanol a en presencia de NaOH como catalizador. El metanol se alimenta con una relación del 24% en peso con respecto al aceite y el catalizador en 2% peso con respecto al aceite a 55°C (dato recabado de primera mano), cabe mencionar que las cinéticas de reacción se observan en el Anexo V. Se usa un decantador (D-102), para separar el biodiesel de la glicerina cruda, ambas corrientes contienen metanol, por lo que se usan evaporadores (E-101 y E-102) para reducir el contenido de metanol en el biodiesel (Zhang et al., 2003).

Finalmente se utiliza una columna con resinas poliméricas para absorber el resto de impurezas. Se utilizaron porcentajes de remoción calculados a partir de los datos experimentales de Berrios & Skelton como se puede observar en la Tabla 18 (Berrios & Skelton, 2008).

Tabla 18 Porcentaje de retención de las resinas poliméricas

Compuesto	Porcentaje de retención
Glicerol	63.63
Monoglicéridos	21.73
Diglecéridos	42.85
Triglicéridos	20.93
Metanol	27.14

Se consideró la combustión de la torta residual para la producción de vapor de uso interno, únicamente para el proceso de la obtención del aceite de palma. En el Anexo VI se describen las suposiciones y el procedimiento que se llevó a cabo para realizar la simulación para producir calor. En la Tabla 19 se observa las especificaciones de diseño utilizadas en el simulador Aspen Plus.

Tabla 19 Especificaciones de diseño para la simulación de la producción de biodiesel a partir de aceite de palma

Equipo	Datos de entrada	Bloque de simulación utilizado	Equipo	Datos de entrada	Bloque de simulación utilizado
M-102	Presión: 1 atm Temperatura: 25°C	Mixer modelo termodinámico UNIFAC	M-105	Presión: 1 atm Temperatura: 25°C	Mixer modelo termodinámico UNIFAC
R-101	Presión: 1 atm Temperatura: 55°C, Tiempo residencia:90 min	RCSTR modelo termodinámico UNIFAC	E-101	Presión: 0.29 atm Temperatura: 85°C	Flash2 modelo termodinámico UNIFAC
S-101	Retira todas las sales de la corriente F20	SEP modelo termodinámico UNIFAC	D-102	Presion: 1 atm T: 25°C	DECANTER modelo termodinámico UNIFAC
D-101	Presion: 1 atm T: 25°C	DECANTER modelo termodinámico UNIFAC	IC-105	Presión: 1 atm Temperatura salida: 30°C (servicio de enfriamiento)	Heater modelo termodinámico UNIFAC

R-102	Presion 1 atm Temperatura: 90°C	RSTOIC modelo termodinámico UNIFAC	IC-106	Presión: 1 atm Temperatura salida: 30°C (servicio de enfriamiento)	Heater modelo termodinámico UNIFAC
M-103	Presión: 1 atm Temperatura: 25°C	Mixer modelo termodinámico UNIFAC	IC-107	Presión: 1 atm Temperatura salida: 30°C (servicio de enfriamiento)	Heater modelo termodinámico UNIFAC
M-104	Presión: 1 atm Temperatura: 25°C	Mixer modelo termodinámico UNIFAC	E-102	Presión: 1 atm Temperatura: 85°C	Flash2 modelo termodinámico UNIFAC
IC-104	Presion 1 atm Temperatura fría de salida: 44°C	HeatX modelo termodinámico UNIFAC	S-102	Columna de resinas poliméricas utiliza los porcentajes de remoción de la Tabla 5	SEP modelo termodinámico UNIFAC
R-103	Presión: 1 atm Temperatura: 55°C, Tiempo residencia:90 min	RCSTR modelo termodinámico UNIFAC	IC-108	Presión: 1 atm Temperatura salida: 30°C (servicio de enfriamiento)	Heater modelo termodinámico UNIFAC
IC-106	Presion 1 atm Temperatura: 55°C (Requiere servicio de calentamiento)	Heater modelo termodinámico UNIFAC			

Etapa de distribución y uso: Se asumió una distancia promedio de 100 km desde la planta industrial (Sheinbaum-Pardo et al., 2013) hasta el punto de venta en los cuatro estados (Chiapas, Campeche, Tabasco y Veracruz). También se asumió que el biodiesel se transporta en camiones pipa de 10,000 L de capacidad con un consumo de combustible diésel promedio de 2.5 km·L⁻¹ (CAPUFE) Se asumió que el uso de biodiesel se utilizará en motores diésel de autobuses y camiones.

Etapa de gestión de residuos: Se consideran las emisiones asociadas a la disposición en relleno sanitario de los residuos sólidos obtenidos durante la etapa industrial, que son esencialmente las cenizas remanentes de la combustión de la biomasa. El agua residual de los procesos de esterilización y clarificado son normalmente tratadas en lagunas facultativas, las cuales tienen la desventaja de emitir gas metano (CUE, 2012). De igual manera, los racimos de fruta vacía y la fracción de la torta de extracción que no se quema se depositan en vertederos a cielo abierto.

Ruta tecnológica de segunda generación (ACU)

La ruta tecnológica actual de segunda generación consiste en la recolección de ACU en 195,742 m³ anual en el periodo 2016-2040, lo que resulta en producciones anuales promedio de 175,946 m³ de biodiesel, 17,136 t de glicerina y 2441 t de sulfato de potasio. El ciclo de vida inicia en la etapa de recolección del ACU de restaurantes, plazas comerciales, hoteles, etc. y su transporte a la planta industrial. No se asignan emisiones al ACU por considerarse que todas las emisiones de la obtención de aceite se atribuyen al uso del aceite de cocina virgen. Se incluye la etapa industrial de transformación del ACU en biodiesel, glicerina y sulfato de potasio, así como la distribución y uso del biodiesel, y la gestión de los residuos generados en la etapa industrial. En la Figura 18 se observan los límites del sistema estudiado para obtener biodiesel a partir de ACU.

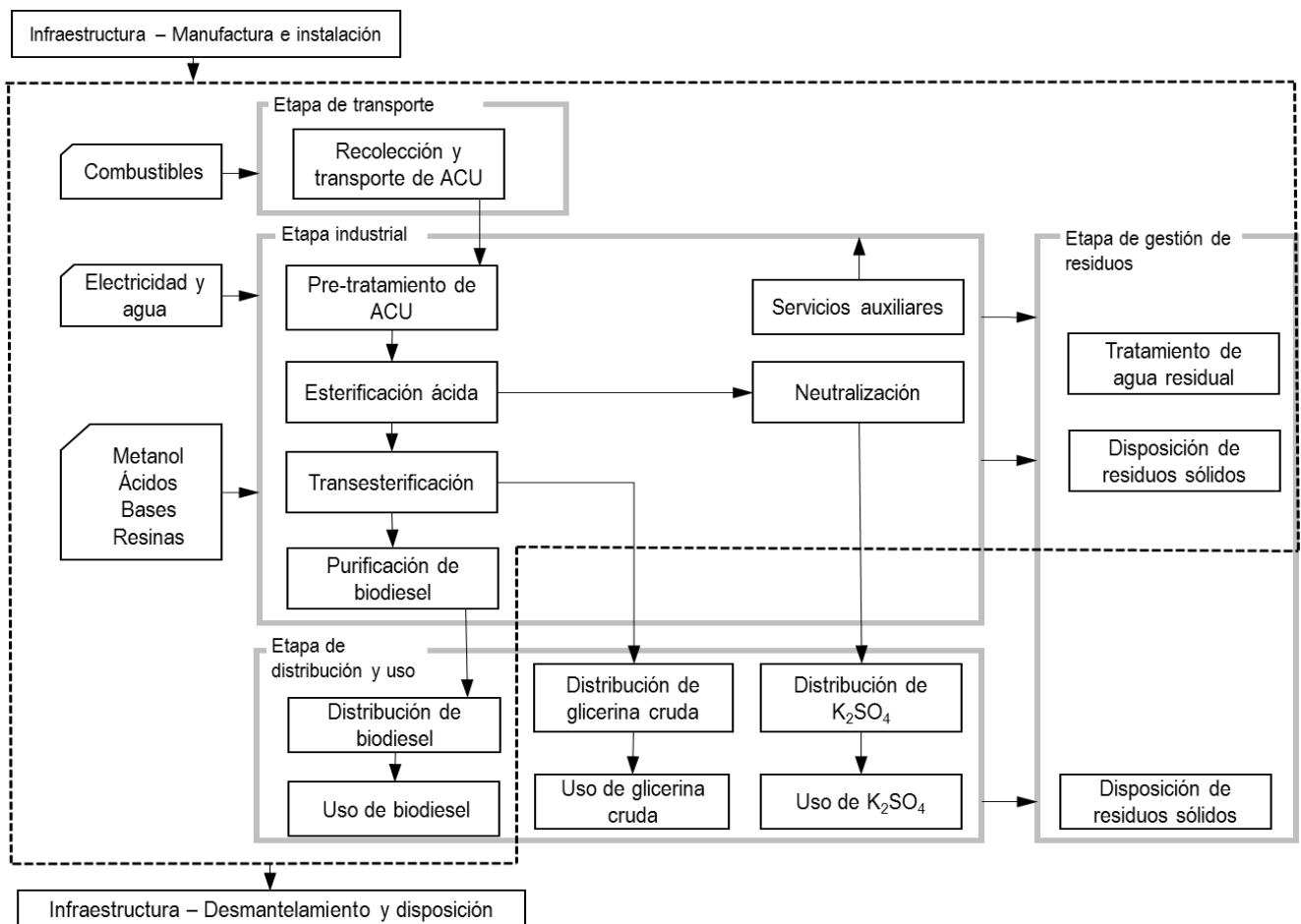


Figura 18 Límites del sistema para la producción de biodiesel a partir de ACU

Etapa industrial: De acuerdo con los porcentajes esperados de filtración y separación en la etapa de pretratamiento, se consideró que en cada kilogramo de aceite recolectado se tienen 850 g de ACU, 100 g de agua y 50 g de sólidos (González-Canal & González-Ubierna, 2014).

En la

Figura 19 se observa el diseño de proceso que se usó para completar los inventarios, principalmente los requerimientos energéticos.

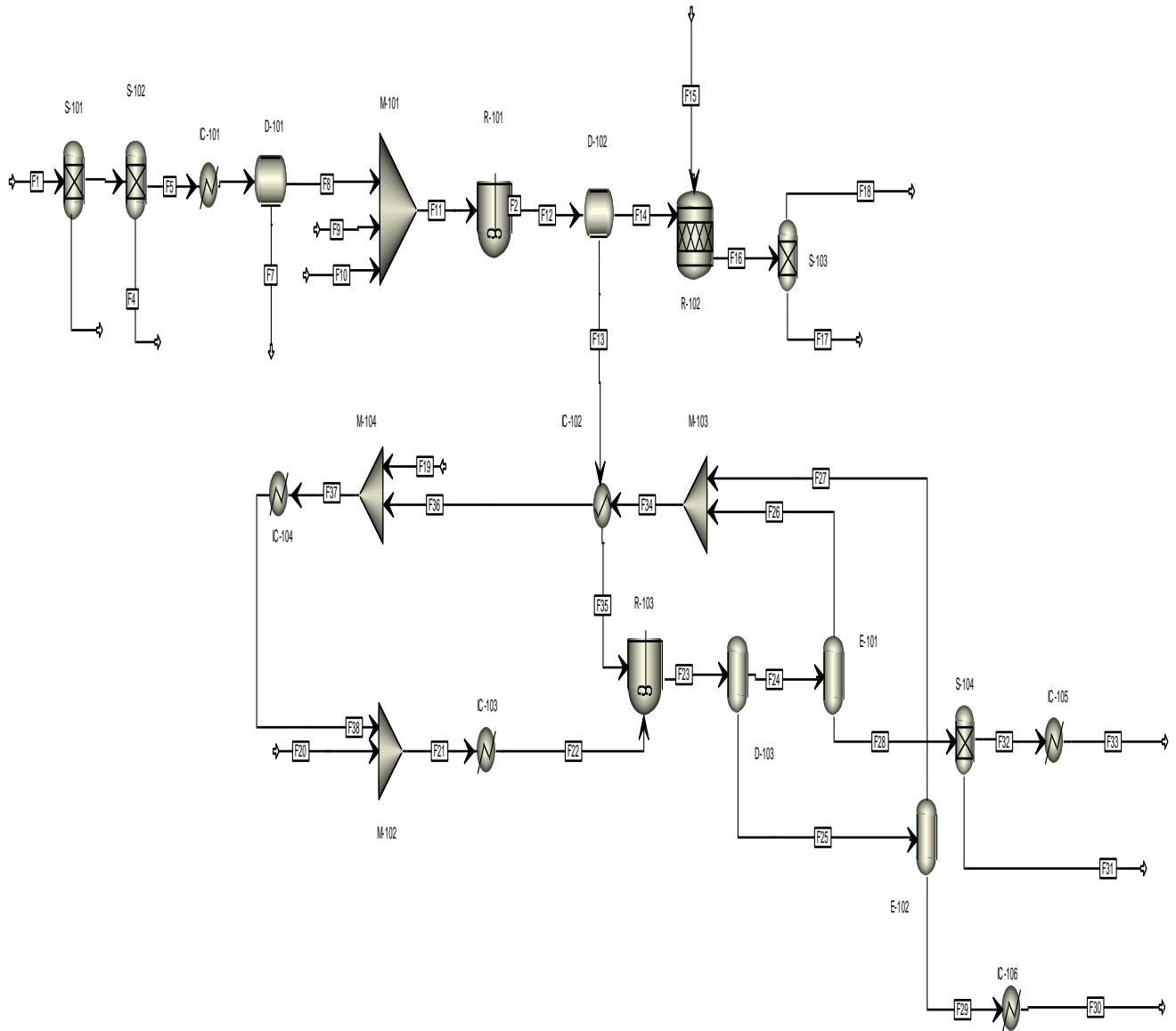


Figura 19 Diagrama de flujo de proceso para la producción de biodiesel a partir del aceite residual de cocina

En la Tabla 20 se describen los equipos usados para completar los inventarios en la producción de biodiesel a partir de ACU.

Tabla 20 Descripción de los equipos de procesos de la producción de biodiesel a partir de ACU

Equipo	Descripción	Equipo	Descripción	Equipo	Descripción
S-101	Sedimentador	D-101	Decantador	E-101	Evaporador
S-102	Filtro	R-102	Reactor	D-102	Decantador
IC-101	Intercambiador de calor	IC-103	Intercambiador de calor	IC-106	Intercambiador de calor
IC-102	Intercambiador de calor	IC-104	Intercambiador de calor	E-102	Evaporador
M-101	Mezclador	IC-105	Intercambiador de calor	S-104	Columna de resinas poliméricas
R-101	Reactor agitado continuo	M-102	Mezclador	M-103	Mezclador
S-103	Separador	R-103	Reactor agitado continuo	M-104	Mezclador

La composición química del aceite se estimó a partir del perfil de ácidos grasos del aceite con la metodología de la composición más probable de Hayakawa (1967). El perfil de ácidos grasos considerado se muestra en la. En la Tabla 21 se hizo la consideración de sumar las contribuciones de los ácidos araquidónico, behénico y eicosanoico a la concentración de ácido oleico, puesto que sólo representan un 0.73% y no se tienen las propiedades fisicoquímicas, por lo que el simulador no reconoce estos compuestos.

Tabla 21 Perfil de ácidos grasos de ACU

Ácido graso	Composición (%)
Mirístico	0.51
Palmitico	11.97
Esteárico	3.43
Oleico	47.41
Linoleico	35.97
Linolénico	0.70

Tomando en cuenta que la distribución de la biomasa se considera como sigue: 1 kg de ACU, contiene un 85% de aceite, 10% de agua y 5% solidos a partir de esto se

determinó la composición del aceite (González-Canal & González-Ubierna, 2014). En la Tabla 22 se observa la composición del aceite obtenido a partir del método de Hayakawa.

Tabla 22 Composiciones en porcentaje peso del ACU

Ácido grasos	Composición (%)	Ácido grasos	Composición (%)	Ácido grasos	Composición (%)
Ac. Linolenico	2.98	POM	0.15	LIOO	12.24
Ac.linoleico	2.93	PLIM	0.13	OLILI	10.08
Ac. Estearico	0.26	SOS	0.12	MOO	0.27
Ac. Oleico	8.12	SLIS	0.10	OLIM	0.27
POP	1.64	SOO	1.86	LIOLI	5.04
PLIP	1.35	SLIO	1.53	LILILI	4.15
POS	0.87	SOLI	1.53	LIOM	0.27
PLIS	0.72	SLILI	1.26	MLILI	0.22
POO	6.97	SOM	0.04	MOM	0.00
PLIO	5.74	SLIM	0.03	MLIM	0.00
POLI	5.74	OOO	7.43	Agua	0.10
PLILI	4.73	OLIO	6.12	Solidos	5.00

Para realizar el pre-tratamiento del ACU recolectado se almacena en sedimentadores (S-101) donde aproximadamente un 60% de los sólidos se remueve (Berrios, Siles, Martin, & Martin, 2007); el resto de los sólidos se retira posteriormente por filtración (S-102) con mallas metálicas. El aceite filtrado (F5) se precalienta a 55 °C en un intercambiador de calor (IC-101) para llevar a cabo la esterificación ácida en lotes para obtener 8000 L diarios de biodiesel. Posteriormente se lleva a cabo la esterificación acida y posteriormente la transesterificación (de la misma manera como se describió en la sección de la ruta tecnológica para aceite de palma, las reacciones para la esterificación acida, así como la reacción de transesterificación se encuentran en el Anexo V). En la Tabla 23 se detallan otras consideraciones de simulación de los equipos mencionados.

Tabla 23. Especificaciones de diseño para la simulación de la producción de biodiesel a partir de ACU

Equipo	Datos de entrada	Bloque de simulación utilizado	Equipo	Datos de entrada	Bloque de simulación utilizado
S-101	Retira el 60% de residuos de comida quemados	SEP modelo termodinámico UNIFAC	M-102	Presión: 1 atm Temperatura: 25°C	Mixer modelo termodinámico UNIFAC

S-102	Retira el resto de residuos de comida	SEP modelo termodinámico UNIFAC	M-103	Presión: 1 atm Temperatura: 25°C	Mixer modelo termodinámico UNIFAC
IC-101	Presión: 1 atm Temperatura: 55°C Secador (servicio de calentamiento)	Heater modelo termodinámico UNIFAC	M-104	Presión: 1 atm Temperatura: 25°C	Mixer modelo termodinámico UNIFAC
D-101	Presión: 1 atm T: 25°C	DECANTER modelo termodinámico UNIFAC	E-101	Presión: 0.29 atm Temperatura: 85°C	Flash2 modelo termodinámico UNIFAC
M-101	Presión: 1 atm Temperatura: 25°C	Mixer modelo termodinámico UNIFAC	D-102	Presión: 1 atm T: 25°C	DECANTER modelo termodinámico UNIFAC
R-101	Presión: 1 atm Temperatura: 55°C, Tiempo residencia: 90 min	RCSTR modelo termodinámico UNIFAC	IC-104	Presión: 1 atm Temperatura salida: 30°C (servicio de enfriamiento)	Heater modelo termodinámico UNIFAC
S-103	Retira todas las sales de la corriente F20	SEP modelo termodinámico UNIFAC	IC-105	Presión: 1 atm Temperatura salida: 30°C (servicio de enfriamiento)	Heater modelo termodinámico UNIFAC
D-102	Presión: 1 atm T: 25°C	DECANTER modelo termodinámico UNIFAC	IC-106	Presión: 1 atm Temperatura salida: 30°C (servicio de enfriamiento)	Heater modelo termodinámico UNIFAC
R-102	Presión: 1 atm Temperatura: 90°C	RSTOIC modelo termodinámico UNIFAC	E-102	Presión: 1 atm Temperatura: 85°C	Flash2 modelo termodinámico UNIFAC
IC-102	Presión: 1 atm Temperatura fría de salida: 44°C	HeatX modelo termodinámico UNIFAC	S-104	Columna de resinas poliméricas utiliza los porcentajes de remoción de la Tabla 5	SEP modelo termodinámico UNIFAC
R-103	Presión: 1 atm Temperatura:	RCSTR modelo termodinámico UNIFAC	D-103	Presión: 1 atm T: 55°C	DECANTER modelo termodinámico UNIFAC

	55°C, Tiempo residencia:90 min	
IC-103	Presion 1 atm	Heater modelo
	Temperatura: 55°C (Requiere servicio de calentamiento)	termodinámico UNIFAC

Etapa de distribución y uso: Para representar la distribución del biodiésel se modeló el requerimiento de transporte del biodiésel desde la fábrica hasta los puntos de venta. Se asume que la mezcla con diésel ocurre en el mismo sitio y sin una demanda significativa de energía. Para esto, se asumió una distancia promedio de 100 km desde la planta industrial hasta el punto de venta (Sheinbaum-Pardo et al., 2013) y que el biodiesel se transporta en camiones pipa de 10,000 L de capacidad con un consumo de combustible diésel de 2.50 km por litro. Por su parte, se asumió que el biodiesel se usa como en motores diésel de autobuses y camiones.

Etapa de gestión de residuos: Se considera las emisiones asociadas a la disposición en relleno sanitario de los residuos sólidos de la etapa industrial, es decir, los sólidos separados del ACU y las resinas poliméricas agotadas. De igual manera se obtienen residuos sólidos como trazas de potasa, bolsas y trapos. Durante el pretratamiento del aceite se utiliza detergentes y desengrasante diluido con agua que se va al drenaje. En el Anexo VII se encuentran los resultados obtenidos en la simulación.

Ruta tecnológica de tercera generación (levaduras)

La ruta tecnológica potencial de tercera generación, consiste en la re-utilización de 107,824 m³ de glicerina cruda, durante el periodo comprendido del 2016 al 2040, lo que resulta en producciones anuales de 21,996 m³ de biodiesel y 328 t de sulfato de potasio. Cabe mencionar que, para la transformación de la glicerina cruda a aceite para obtener biodiesel, se usó la levadura *Yarrowia lipolytica* los datos a utilizar se consideraron de artículos de divulgación científica, con respecto a los datos de la levadura se utilizaron los datos experimentales obtenidos del CIATEJ Unidad Guadalajara a partir de una planta a escala piloto de 200 l (Dra. Georgina Sandoval). La tecnología con respecto a la obtención del aceite a partir de levaduras está aprobada a nivel laboratorio y escala piloto.

Los límites del sistema para realizar el ACV no contempla la etapa de transporte hasta la planta industrial puesto que se llevará a cabo en el mismo sistema de bioenergía durante la producción de biodiesel a partir de ACU y aceite de palma. Los límites del sistema estudiado para obtener biodiesel a partir de levaduras.

Se observa en la Figura 20 los límites frontera del sistema en la producción de biodiesel a partir de levaduras.

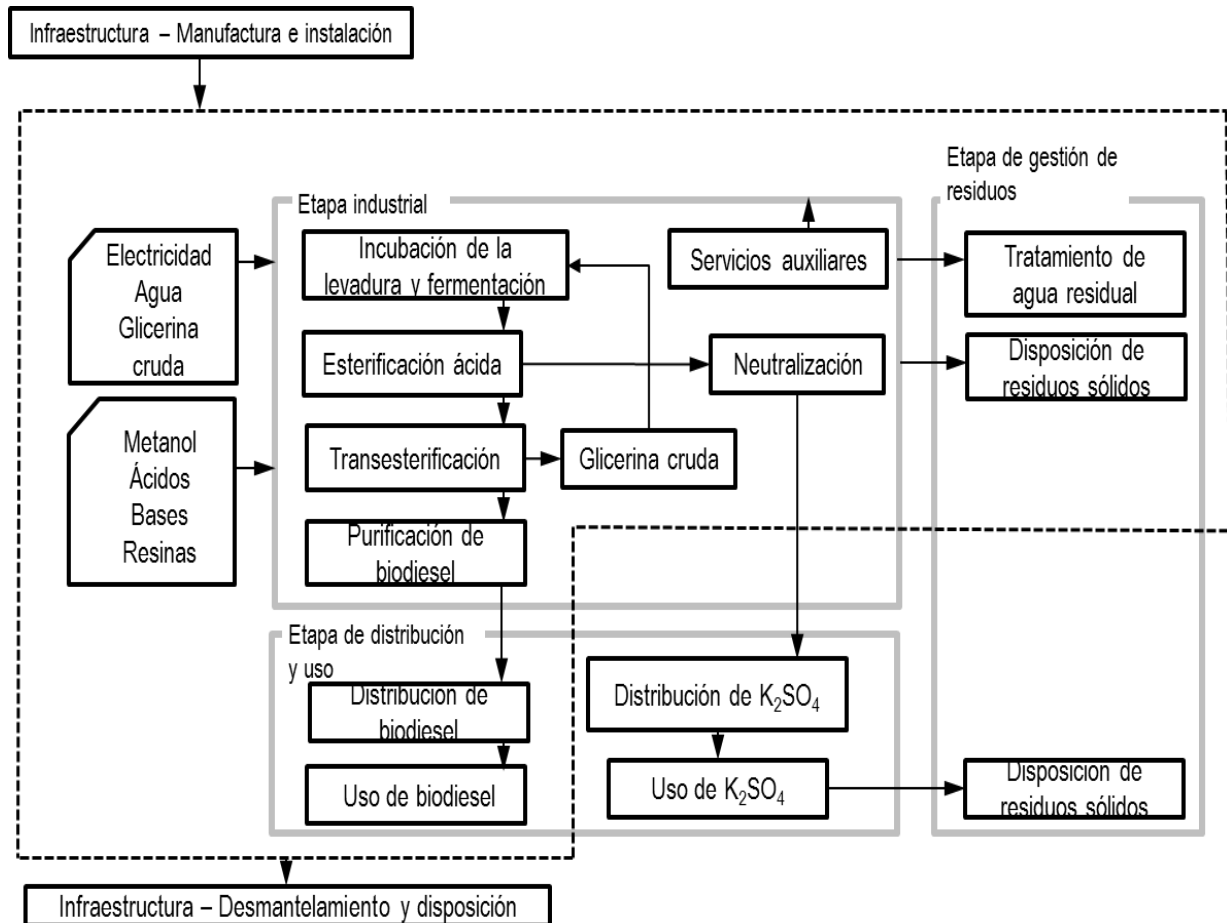


Figura 20 Límites del sistema para la producción de biodiesel a partir de levaduras

Etapa industrial: La levadura *Yarrowia lipolytica* tiene que incubarse con el objetivo de que los microorganismos crezcan adecuadamente (M-101). En la Tabla 24 se presentan los datos utilizados para la incubación. Esto ayudará a ajustar el pH de 4.5 a 6, tener una relación óptima de C/N de 150. El agua residual requerida será de un 90% (Angerbauer et al., 2008).

Tabla 24 Datos para la incubación de levaduras

Compuesto	g/l
(NH ₄) ₂ SO ₄	0.05
Levadura	0.01
Glicerina cruda	30

Fuente: CIATEJ

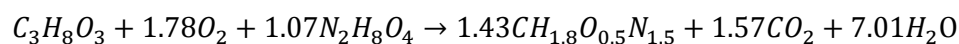
Es necesario llevar a cabo una etapa de precalentamiento para esterilizar la incubación esto se lleva a cabo 130° C (IC-101), se requiere vapor de presión baja a 160°C para obtener los requerimientos necesarios de temperatura (F4) (Koutinas et al., 2014), puesto que la fermentación se lleva a cabo a 30°C, es necesario enfriar la corriente de la salida de la esterilización (F6) en un intercambiador de calor (IC-102) que entrara al fermentador (RF-101). Es necesario utilizar aire (F8), este tiene que mantenerse igual o por encima del 20% del aire estequiométrico y el proceso tiene que agitarse a 180 rpm (André et al., 2010; Chatzifragkou et al., 2011). Los datos utilizados para llevar a cabo el estudio fueron los que se observan en la Tabla 25.

Tabla 25 Datos de la *Yarrowia lipolytica*

X	contenido		Y	sustrato	L lípidos
producida	de aceite	Y x/s (g/g)	L/x g/g	consumido	producidos
g/l	w/w			g/l	g/l
15	60%	0.6	0.44	30	9

Donde x se refiere a las levaduras, L al producto (aceite) y s al sustrato. Los datos fueron proporcionados por el CIATEJ.

La reacción estequiometria a utilizar es la siguiente



En la Tabla 26 se observa la descripción de los equipos de proceso.

Tabla 26 Descripción de los equipos de procesos de la producción de biodiesel a partir de levaduras

Equipo	Descripción	Equipo	Descripción	Equipo	Descripción
M-101	Medio de cultivo	S-102	Separador		
IC-101	Intercambiador de calor	D-101	Decantador	D-102	Decantador
IC-102	Intercambiador de calor	R-102	Reactor	IC-108	Intercambiador de calor
RF-101	Fermentador	IC-105	Intercambiador de calor	E-102	Evaporador
IC-103	Intercambiador de calor	IC-106	Intercambiador de calor	S-104	Columna de resinas poliméricas
S-101	Separador (centrifuga)	IC-107	Intercambiador de calor	M-104	Mezclador
IC-104	Intercambiador de calor	M-103	Mezclador	M-105	Mezclador
M-102	Mezclador	R-103	Reactor agitado continuo	IC-109	Intercambiador de calor
R-101	Reactor agitado continuo	E-101	Evaporador		

El caldo de fermentación se calienta a 65°C (IC-103) para desactivar las enzimas de las levaduras. La masa microbiana se separa del líquido de fermentación mediante una centrifuga (S-101). Finalmente, la humedad del contenido de células microbianas se reduce a 1% o menos utilizando un sistema de secado (IC-104), con el objetivo de no reducir la eficiencia durante la transesterificación. Se optó por una transesterificación directa (Sin extraer los lípidos de la masa microbiana, puesto que es un proceso más económico y sin menos residuos). Por lo que primeramente se realiza una esterificación ácida (R-101), alimentando (F15) H₂SO₄ (1% peso con respecto al aceite) para llevar a cabo la esterificación ácida, junto con metanol (20% peso con respecto al aceite (F16)) usando tiempo de residencia de cuatro horas a 60°C, debido a que simultáneamente se realiza la extracción de los lípidos junto con la esterificación ácida, (Huang, Chen, Xiong, Ma, & Chen, 2013; Koutinas et al., 2014) se realiza la transesterificación ácida (R-102) con las mismas condiciones tomada en cuenta para la ruta tecnológica e la palma y el ACU. Posteriormente se filtran los restos de la biomasa microbiana (S-102), seguido de un a decantación de las fases líquidas (D-101) (corriente de biodiesel y aceite, la otra de metanol y H₂SO₄)

(Koutinas et al., 2014), el resto del proceso se llevó a cabo de la misma manera que las secciones descritas anteriormente (ruta tecnológica para obtener biodiesel a partir de aceite de palma y ACU), a diferencia de que la glicerina cruda (F38) se recircula al mismo proceso para ser usada como sustrato.

Cabe mencionar que el perfil de ácidos grasos libres obtenidos por los microorganismos se observa en la Tabla 27.

Tabla 27 Composición del perfil de ácidos grasos libres obtenidos a partir de levaduras

Compuesto	Composición en porcentaje peso
palmitico	18.72
Esteárico	8.97
Oleico	53.43
Linoleico	18.75
Linolenico	0.46

Datos proporcionados por el CIATEJ

A partir de los datos anteriores, se obtuvo la composición del aceite utilizando la metodología propuesta por Hayakawa (1967). En la Tabla 28 se muestran las fracciones peso del aceite.

Tabla 28 Composición en fracción peso del aceite obtenido a partir de las levaduras

Compuesto	Fracción peso	Compuesto	Fracción peso
Ac. Linolenico	0.0046	SLIS	0.0044
Ac.linoleico	0.0047	SOO	0.0796
Ac. Estearico	0.0001	SLIO	0.0281
Ac. Oleico	0.0252	SOLI	0.0281
POP	0.0625	SLILI	0.0099
PLIP	0.0220	OOO	0.0000
POS	0.0558	OLIO	0.0000
PLIS	0.0197	LIOO	0.1274
POO	0.1785	OLILI	0.0449
PLIO	0.0629	LIOLI	0.0899
POLI	0.0629	LILILI	0.0317
PLILI	0.0222	Agua	0.0010
SOS	0.0124		

LI se requiere al ácido linoleico, O ácido oleico, P palmítico y S esteárico. El compuesto que tiene tres letras se refiere a un triglicérido y la letra corresponde a la posición que este ocupa.

En la Tabla 29 se detallan otras consideraciones de simulación de los equipos mencionados.

Tabla 29 Especificaciones de diseño para la simulación de la producción de biodiesel a partir de levaduras

Equipo	Datos de entrada	Bloque de simulación utilizado	Equipo	Datos de entrada	Bloque de simulación utilizado
M-101	Presión: 1 atm Temperatura: 30°C	Mixer modelo termodinámico UNIFAC	IC-107	Presión: 1 atm Temperatura: 55°C (servicio de calentamiento)	Heater modelo termodinámico UNIFAC
IC-101	Presión 1 atm Temperatura caliente de salida: 140°C	HeatX modelo termodinámico UNIFAC	M-103	Presión: 1 atm Temperatura: 25°C	Mixer modelo termodinámico UNIFAC
IC-102	Presión: 1 atm Temperatura: 30°C (servicio de enfriamiento)	Heater modelo termodinámico UNIFAC	R-103	Presión: 1 atm Temperatura: 55°C, Tiempo residencia: 90 min	RCSTR modelo termodinámico UNIFAC
RF-101	Presión: 1 atm Temperatura: 30°C Reacción estequiometría descrita anteriormente	Hierarchy modelo termodinámico UNIFAC	E-101	Presión: 0.29 atm Temperatura: 85°C	Flash2 modelo termodinámico UNIFAC
IC-103	Presión: 1 atm Temperatura: 65°C (servicio de calentamiento)	Heater modelo termodinámico UNIFAC	S-103	Retira todo el sulfato de potasio de la corriente F26	SEP modelo termodinámico UNIFAC
S-101	Retira toda la biomasa	SEP modelo termodinámico UNIFAC	D-102	Presión: 1 atm T: 30°C	DECANTER modelo termodinámico UNIFAC
IC-104	Deshidrata el aceite hasta reducir la humedad a 1%	Hierarchy Modelo termodinámico: UNIFAC	IC-108	Presión: 1 atm Temperatura salida: 30°C (servicio de enfriamiento)	Heater modelo termodinámico UNIFAC

M-102	Presión: 1 atm Temperatura: 30°C	Mixer modelo termodinámico UNIFAC	E-102	Presión: 1 atm Temperatura: 85°C	Flash2 modelo termodinámico UNIFAC
R-101	Presión: 1 atm Temperatura: 60°C, Tiempo residencia:4 horas	RCSTR modelo termodinámico UNIFAC	S-104	Columna de resinas poliméricas utiliza los porcentajes de remoción de la Tabla 4	SEP modelo termodinámico UNIFAC
S-102	Retira toda la biomasa residual	SEP modelo termodinámico UNIFAC	D-102	Presion: 1 atm T: 25°C	DECANTER modelo termodinámico UNIFAC
D-101	Presion: 1 atm T: 30°C	DECANTER modelo termodinámico UNIFAC	M-104	Presión: 1 atm Temperatura: 30°C	Mixer modelo termodinámico UNIFAC
R-102	Presion 1 atm Temperatura: 90°C	RSTOIC modelo termodinámico UNIFAC	M-105	Presión: 1 atm Temperatura: 30°C	Mixer modelo termodinámico UNIFAC
IC-105	Presion 1 atm Temperatura fría de salida: 46°C	HeatX modelo termodinámico UNIFAC	IC-109	Presión: 1 atm Temperatura salida: 30°C (servicio de enfriamiento)	Heater modelo termodinámico UNIFAC
IC-106	Presion 1 atm Temperatura: 30°C (Requiere servicio de enfriamiento)	Heater modelo termodinámico UNIFAC			

Etapas de distribución y uso: Para representar la distribución del biodiésel se modeló el requerimiento de transporte del biodiésel desde la fábrica hasta los puntos de venta. Se asume que la mezcla con diésel ocurre en el mismo sitio y sin una demanda significativa de energía. Para esto, se asumió una distancia promedio de 100 km desde la planta industrial hasta el punto de venta (Sheinbaum-Pardo et al., 2013) y que el biodiesel se transporta en camiones pipa de 10,000 L de capacidad con un consumo de combustible diésel de 2.50 km por litro (CAPUFE).

Etapa de gestión de residuos: Se considera las emisiones asociadas a la disposición en relleno sanitario de los resultados obtenidos durante la etapa industrial, en este caso los lodos del fermentador, estas tienen que ser sometida a un tratamiento de efluentes (digestor anaerobio). En el Anexo VIII se observan los resultados de la simulación.

Resultados del análisis de ciclo de vida

En esta sección se describe los resultados del ACV para cada una de las rutas tecnológicas estudiadas.

Análisis de ciclo de vida del biodiesel a partir de aceite de palma

Se observa en la Tabla 30 el resumen de los productos, así como el consumo de agua fresca y la razón de energía producida a energía fósil consumida

Tabla 30 Resumen de los productos e índices de eficiencia de la producción de biodiesel a partir de aceite de palma

Parámetro	Unidad	Cantidad
Agronómicos		
Uso de suelo total	ha·a	16,547,653
Extensión del cambio de uso de suelo	ha	1,384,030
Productos		
Biodiesel (masa)	t ·a ⁻¹	1.36E+06
Biodiesel (energía)	MJ ·a ⁻¹	4.92E+10
Biodiesel (volumen)	m ³ ·a ⁻¹	1.51E+06
Glicerina cruda	t ·a ⁻¹	1.59E+05
Sulfato de potasio	t ·a ⁻¹	2.22E+04
Aceite de palmiste	t ·a ⁻¹	3.42E+05
Forraje (harina de palmiste)	t ·a ⁻¹	4.89E+05
Vapor (autoconsumo)	m ³ ·a ⁻¹	3.17E+05
Índices de eficiencia y consumo		
Consumo de agua en el ciclo de vida (WC)	m ³ ·a ⁻¹	5.36E+09
Masa		
Razón de insumos a productos	%	36
Razón de insumos a biocombustibles	%	18
Energía		
Razón Neta de Energía (REN) (energía producida a energía consumida)	—	2.1

El inventario del ciclo de vida se observa en la Tabla 31 (el balance de materia y energía de la etapa industrial se encuentra en el Anexo VII).

Tabla 31 Inventario de ciclo de vida para la producción de biodiesel a partir de aceite de palma por MJ de biodiesel al año (Etapa agrícola)

Parámetro	Unidad / MJ ⁻¹	Cantidad
Insumos		
Etapa agrícola		
Urea	kg	6.11E-04
Triple 17	kg	2.89E-03
Cloruro de potasio	kg	5.32E-04
NPK 14-14-14	kg	1.30E-04
Paraquat	kg	1.98E-06
Gramoxone	kg	9.61E-06
Karmex	kg	3.40E-06
Glifosato	kg	1.06E-05
Velfosato	kg	6.57E-07
Faena	kg	5.04E-07
Graminicida	kg	2.40E-07
Cupoquat	kg	2.59E-07
Cerillo	kg	1.76E-07
Foley	kg	7.40E-07
Arrivo	kg	6.90E-10
Folidol	kg	1.09E-09
Siroco	kg	9.56E-07
Parathion	kg	5.06E-05
Captan	kg	7.09E-07
Malathion	kg	2.18E-06
Agrimycin	kg	3.40E-06
Thiram	kg	4.57E-06
Venomil	kg	7.08E-08
Rodenticida	kg	2.79E-05
Diesel	tkm	7.94E-05
Etapa de transporte		
Diésel	tkm	2.59E-2
Etapa industrial		
Metanol	kg	4.55E-03
KOH	kg	2.05E-04
NaOH	kg	5.52E-04
Ácido sulfúrico	kg	2.00E-04
Electricidad	kWh	6.67E-03
Agua	m ³	3.93E-05
Carbón activado	kg	1.69E-05
Resinas	kg	8.00E-06
Etapa de distribución y uso		
Diésel	kg	1.90E-05
Residuos para tratamiento		
Racimos de fruta vacía	kg	3.39E-02
Fibra	kg	1.64E-02
Aguas residuales	kg	1.29E-01
Cenizas	kg	6.14E-05
Residuos sólidos (varios)	kg	6.31E-05
Productos		
Biodiesel (masa)	kg	2.51E-02

Parámetro	Unidad / MJ ⁻¹	Cantidad
Biodiesel (energía)	MJ	1.00E+00
Biodiesel (volumen)	L	2.85E-02
Glicerina cruda	kg	2.78E-03
Sulfato de potasio	kg	3.96E-04

En el Anexo IX se reportan los módulos utilizados en SimaPro para modelar las etapas de producción y distribución de los insumos.

La Tabla 32 muestra las emisiones estimadas al aire, agua y suelo durante la aplicación (etapa de uso) de fertilizantes, así como las emisiones de dióxido de carbono por concepto de cambio en el uso del suelo. Las emisiones de metales pesados fueron estimadas con el modelo de la ART (Emeck T, 2011) considerando las dosis de nitrógeno, fósforo y potasio correspondientes a los fertilizantes del inventario según se explica en el Anexo X. Por otro lado, los modelos de la *Roundtable for Sustainable Biomaterials* (RSB) se utilizaron para estimar las emisiones de gases de efecto invernadero NH₃, N₂O y NO_x emitidos por la aplicación de fertilizantes y las emisiones de GEI por concepto y cambio del uso del suelo directo, asumiendo que los cultivos implican el cambio de pastizales manejados a tierras de cultivo en una zona tropical húmeda, en un suelo tipo arcilloso de alta actividad (HAC).

Tabla 32. Emisiones derivadas de la etapa agronómica por concepto de uso de fertilizantes y cambio de uso del suelo. Cantidades referidas a 1 MJ de biodiesel producido.

Parámetro	Unidad/ MJ ⁻¹	Cantidad
Emisiones al aire		
N ₂ O	kg	1.49E-05
NO _x	kg	3.14E-06
NH ₃	kg	7.59E-05
CO ₂ por uso de fertilizante	kg	4.41E-04
CO ₂ por CUSd	kg	-3.28E-03
Emisiones al agua		
Nitrato	kg	5.84E-04
Fósforo	kg	8.90E-08
Cadmio	kg	3.56E-11
Cobre	kg	2.46E-10
Zinc	kg	2.27E-08
Plomo	kg	1.20E-10
Níquel	kg	0.00E+00
Cromo	kg	1.31E-09
Emisiones al suelo		
Cadmio	kg	1.39E-07
Cobre	kg	4.18E-09

Zinc	kg	1.57E-06
Plomo	kg	1.80E-08
Níquel	kg	3.42E-07
Cromo	kg	4.59E-10

Por otro lado, se consideran las emisiones generadas al suelo por el uso de pesticidas como se observa en la Tabla 33. Se asume que el 100% de la aplicación del pesticida terminan siendo emisiones al suelo (Nemecek & Schnetzer, 2011).

Tabla 33. Emisiones derivadas por el uso de pesticidas

Emisiones al aire	Unidad/ MJ ⁻¹	Cantidad
1,1'-Dimethyl-4,4'-bipyridinium bis(methyl sul*)	kg	9.61E-06
Captan	kg	7.09E-07
Chlorpyrifos	kg	2.37E-07
Cypermethrin	kg	2.06E-07
Diuron	kg	2.74E-06
Glifosato	kg	1.11E-05
Insecticide	kg	7.08E-08
Malathion	kg	2.18E-06
Paraquat	kg	2.09E-06
Parathion	kg	5.06E-05
Permethrin	kg	2.96E-08
Streptomycin	kg	6.38E-07
Thiram	kg	4.57E-06

En la Tabla 34 se observan las emisiones generadas por los racimos de fruta vacía y torta de extracción en vertedero a cielo abierto y aguas residuales en las lagunas facultativas, estimadas con los modelos correspondientes del IPCC (IPCC, 2006a) Anexo XI.

Tabla 34 Emisiones estimadas para la etapa de gestión de residuos

Parámetro	Unidad/MJ	Cantidad
Emisiones al aire		
CH ₄	kg	1.05E-03
CO ₂	kg	2.90E-03
N ₂ O	kg	2.65E-07
Emisiones al agua		
Plomo	kg	6.27E-08
Cadmio	kg	2.65E-09
Cromo	kg	4.84E-07

Cobre	kg	2.71E-07
Níquel	kg	1.18E-08
Mercurio	kg	4.41E-09
Zinc	kg	7.08E-07
Emisiones al suelo	kg	
Plomo	kg	4.37E-11
Cadmio	kg	6.98E-12
Cromo	kg	0.00E+00
Cobre	kg	0.00E+00
Níquel	kg	7.64E-10
Zinc	kg	6.03E-10

En la Tabla 35 se observan las emisiones al aire generadas durante la generación de vapor de uso interno usando la torta de extracción. Estas emisiones se estimaron con una simulación con el software Aspen Plus 8.4, siguiendo el procedimiento detallado en el Anexo VI.

Tabla 35. Emisiones durante la combustión de biomasa para generar vapor de alta presión

Emisiones al aire	Unidad/ MJ ⁻¹	Cantidad
Dióxido de carbono	kg	3.68E-03
Monóxido de carbono	kg	3.83E-09
NO	kg	7.53E-06
NO ₂	kg	5.75E-08
Dióxido de azufre	kg	7.49E-06
Trióxido de azufre	kg	2.19E-07

En la Tabla 36 se observan las emisiones generadas por la combustión de cáscaras y los racimos de fruta vacía para generar calor necesario para satisfacer las demandas energéticas únicamente para la extracción del aceite, utilizando el simulador Aspen Plus.

Tabla 36 Emisiones derivadas de la combustión de la biomasa para obtener energía eléctrica

Emisiones al aire	Unidad/ MJ ⁻¹	Cantidad
Nitrógeno	kg	2.83E-02
oxígeno	kg	4.05E-03
Dióxido de carbono	kg	7.41E-03
Monóxido de carbono	kg	3.83E-09
Agua	kg	2.55E-03

NO	kg	1.19E-07
Dicloro	kg	1.21E-05
Dióxido de azufre	kg	1.48E-05
Trióxido de azufre	kg	6.21E-07
Argon	kg	6.50E-04

La Figura 22 muestra la distribución de los impactos ambientales potenciales de los escenarios estudiados en las etapas de producción. El 48% de las emisiones generadas en la categoría de GWP se debe a la etapa de gestión de residuos, para el tratamiento de las aguas residuales provenientes de la etapa de la esterilización y clarificado. Estas aguas se tratan en lagunas y producen gas metano y dióxido de carbono. El 19% del GWP se ubica en la etapa industrial, debido principalmente a la producción de metanol y energía eléctrica, mientras que el 17% se debe a la etapa de transporte por el uso de diesel. En la categoría de HTP, el 29% de las emisiones están en la etapa agrícola durante la producción y uso de fertilizantes, mientras que el 30% se centra en la etapa industrial, debido a la producción y uso de metanol. El 24% del HTP se debe a la etapa de distribución y uso de biodiesel, principalmente en las emisiones generadas de NO_x y benceno por la combustión de biodiesel. En la categoría POCP, el 40% del impacto es causado por las emisiones de metano durante el tratamiento de las aguas residuales en lagunas facultativas y de los vertederos abiertos de los racimos de fruta vacía, mientras que el 21% se debe a la etapa industrial por la producción y uso de metanol, y el 17% de debe a las emisiones de benceno y monóxido de carbono durante la combustión del biodiesel.

La Figura 22 muestra la distribución de los impactos ambientales potenciales de los escenarios estudiados en las etapas de producción.

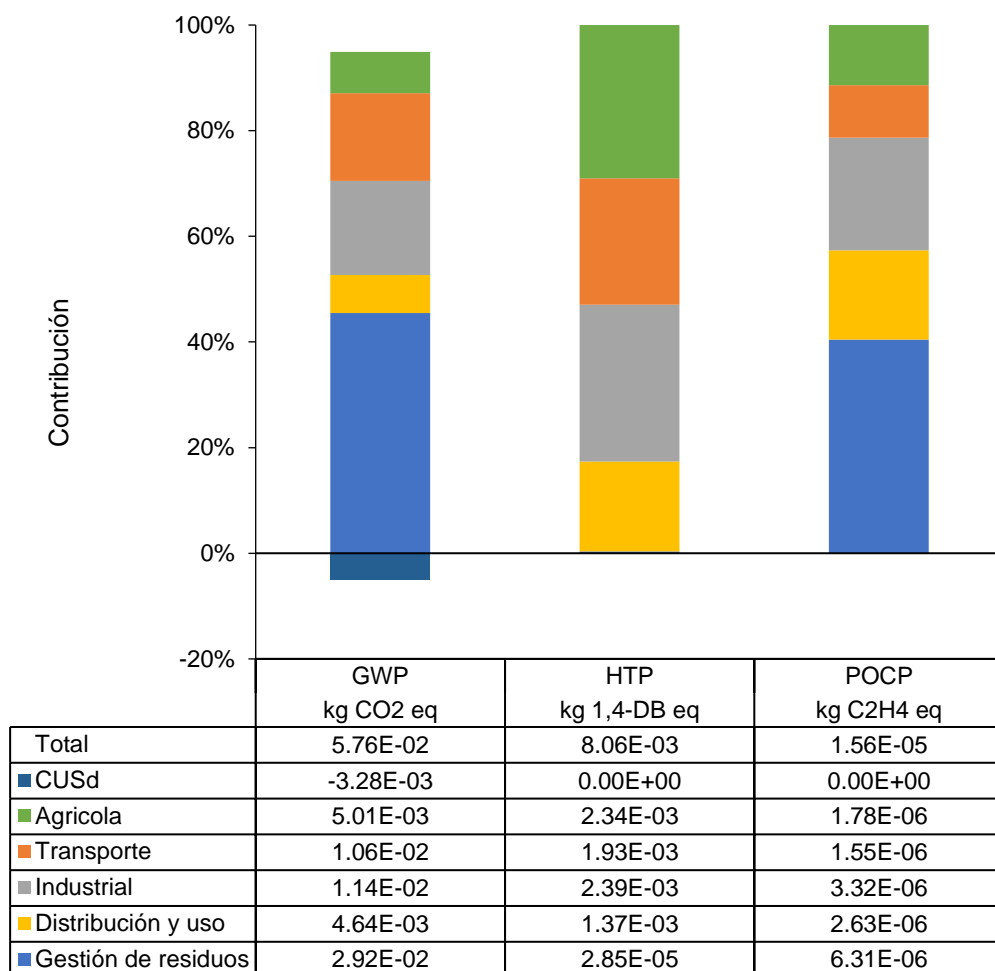


Figura 22 Distribución y valores totales de los impactos ambientales potenciales en las categorías GWP, HTP y POCP, referidos a 1 MJ de biodiesel.

La Figura 23 muestra otros impactos ambientales potenciales del sistema de bioenergía en el escenario propuesto. En general, la etapa agrícola es la que más contribuye al impacto ambiental; en la categoría ADP representa el 92%, debido a la producción de fertilizantes y, en segundo término, a la de pesticidas.

En la categoría ADP-fósil (energía), el 49% del consumo ocurre en la etapa industrial, durante los procesos de producción de metanol y de energía eléctrica, mientras que el 36% del consumo de combustible fósil ocurre durante la etapa de transporte (consumo de diésel), y el 15% ocurre en la etapa agrícola durante la producción de fertilizantes.

En la categoría de impacto ODP, el 31% de las emisiones ocurre en la etapa agrícola, por la producción de fertilizantes, mientras que el 39% se genera en la etapa de transporte y el 29% se debe a la etapa industrial debido a la producción de metanol y en segundo término, de la energía eléctrica.

En las categorías de ecotoxicidad al agua (FWAEP, TEP y MAEP), las emisiones mayoritarias ocurren durante la etapa agrícola por las emisiones generadas durante el uso de fertilizantes y pesticidas, y en la categoría MAEP son especialmente importantes las emisiones durante la producción de metanol y de hidróxido de sodio durante la etapa industrial.

En la categoría AP, el 57% se debe a la distribución y uso del biodiesel, principalmente por las emisiones generadas de benceno y monóxido de carbono generadas durante la combustión de biodiesel, mientras que el 25% la etapa agrícola debido al uso de fertilizantes y pesticidas.

Finalmente, el 46% del EP se debe, en la etapa agrícola, a las emisiones de NO_x y nitrato durante el uso de fertilizantes y pesticidas, mientras que el 43% la etapa de distribución y uso de biodiesel, por el uso de biodiesel.

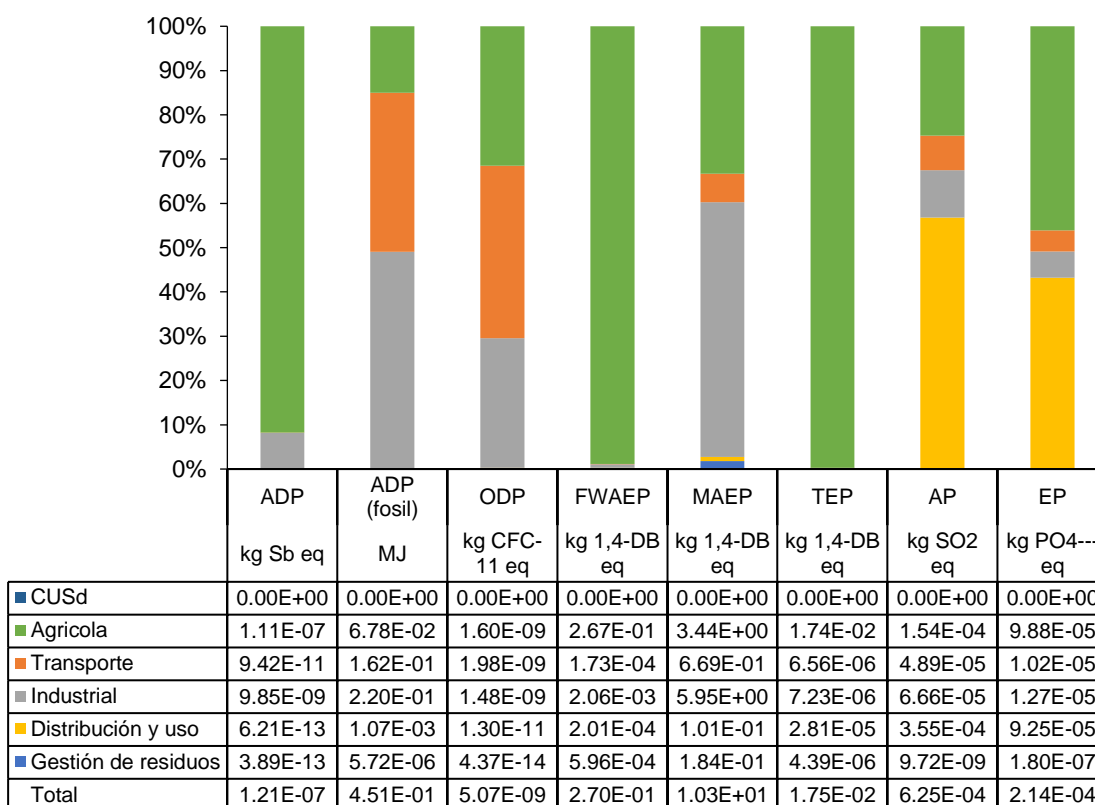


Figura 23 Otros impactos ambientales potenciales del biodiesel de ACU

La Tabla 37 muestra el potencial de mitigación en las tres categorías de impacto ambiental principales, utilizando el método de expansión del sistema por ampliación. El

biodiesel de aceite de palma tiene el potencial de mitigar el 29% del GWP y 77% del HTP. Sin embargo, representa un 47% de incremento en el POCP con respecto al sistema alternativo. Cabe mencionar que el cambio de uso de suelo presenta una buena oportunidad de mitigación cuando las plantaciones de palma reemplazan pastizales manejados, pero incluso cuando no se toma en cuenta, sigue existiendo una mitigación del 25%.

Tabla 37 Potencial de mitigación ambiental de la producción de biodiesel (aceite de palma).

Categoría de impacto	Unidad / MJ ⁻¹	Sistema de bioenergía	Sistema alternativo	% mitigación
GWP	kg CO _{2eq}	5.76E-02	8.14E-02	29%
HTP	kg 1,4-DB _{eq}	8.06E-03	3.50E-02	77%
POCP	kg C ₂ H _{4eq}	1.56E-05	1.06E-05	-47%

El porcentaje de mitigación se calcula con la fórmula: (emisiones del sistema alternativo – emisiones del sistema de bioenergía) / emisiones del sistema alternativo × 100.

El sistema de bioenergía basado en la palma de aceite logra una mitigación en dos categorías de impactos: GWP y HTP. En el GWP la mitigación es de 29% (calculada con los métodos de expansión del sistema) o de 40% si se calcula con asignación energética; esto se debe a que la energía contenida en el aceite de los racimos de fruta fresca únicamente comprende el 61% del poder calorífico inferior de todos los co-productos obtenidos, por lo que las emisiones generadas en la etapa agrícola se reparten entre los co-productos del sistema de bioenergía, principalmente la semilla de palmiste (39%) y la glicerina cruda (5%). De hecho, el método de atribución energética estima resultados más favorables para el sistema de bioenergía en todas las categorías de impacto ambiental. Los resultados de la atribución energética a todos los productos (energéticos y no energéticos) se muestran en la Tabla 38.

Tabla 38 Factores de emisión por atribución energética, referidos a 1 MJ de biodiesel y porcentajes de mitigación (aceite de palma)

Categoría de impacto	Unidad / MJ ⁻¹	F.E. Biodiesel	F.E. Diésel	% mitigación
GWP	kg CO _{2eq}	4.89E-02	8.14E-02	40%
HTP	kg 1,4-DB _{eq}	5.89E-03	3.50E-02	83%
POCP	kg C ₂ H _{4eq}	1.27E-05	1.06E-05	-20%

En la Figura 24 se observa la comparación del sistema alternativo (diésel y sulfato de potasio) con el sistema de bioenergía estudiado.

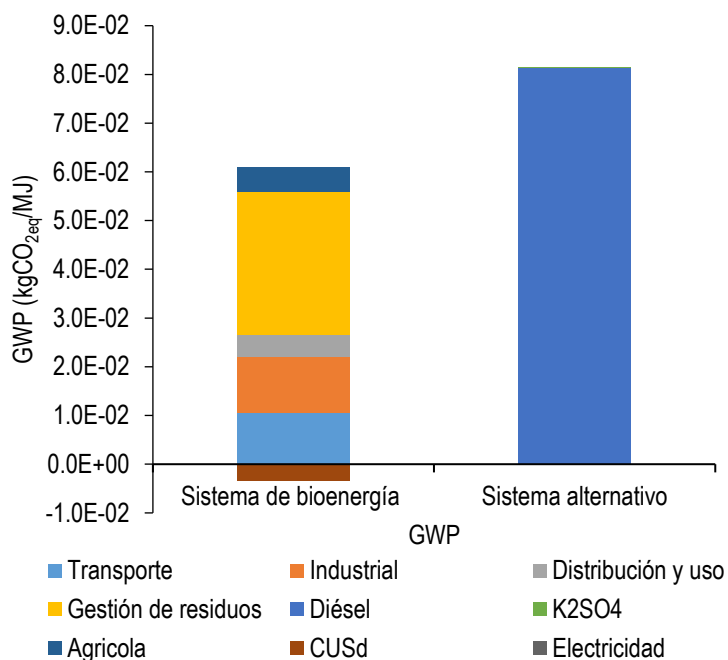


Figura 24. Distribución de los impactos ambientales potenciales en las etapas del sistema de bioenergía en el escenario estudiado (aceite de palma)

El consumo de agua fresca a lo largo del ciclo de vida se estimó considerando tanto los datos de consumo directo, mostrados en la Tabla 39, como los consumos de agua indirectos en todos los insumos y procesos incluidos en los límites del sistema, de acuerdo a los módulos correspondientes utilizados para modelar cada insumo y proceso.

Tabla 39. Consumo de agua en la producción de biodiesel a partir de aceite de palma.

Etapa	Consumo de agua	
	Cantidad (m ³ /MJ)	Porcentaje
Agrícola	1.85E-02	16.93%
Transporte	1.94E-03	1.78%
Industrial	8.86E-02	81.27%
Gestión de residuos	5.43E-06	0.0050%
Distribución y uso	1.28E-05	0.01%
Total	1.09E-01	100.00%

El consumo mayor de agua en el ciclo de vida se concentra en la etapa industrial (81.27%). Del total en esta etapa, las contribuciones principales son los procesos de producción

de energía eléctrica y de metanol. La etapa agrícola contribuye con el 16.9% del total, debido a la producción de fertilizantes, ya que las plantaciones de palma aceitera en clima cálido húmedo no requieren irrigación.

La razón de energía neta (REN) resulta de la división del contenido energético en los productos entre el consumo energético de todo el ciclo de vida, según sus poderes caloríficos inferiores (PCI). La Tabla 40 muestra el consumo y producción de energía de la producción de biodiesel a partir de aceite de palma y los valores de REN calculados. Análogamente a la metodología para estimar el consumo de agua, los consumos energéticos indirectos de los procesos e insumos se tomaron directamente de los módulos de bases de datos, según se detalla en el Anexo IX.

Tabla 40. Indicadores energéticos del sistema de bioenergía en los escenarios estudiados.

Etapa	Consumo de energía	
	Cantidad / MJ ⁻¹	Porcentaje
Consumo de energía		
Agrícola	8.05E-02	16.80%
Transporte	1.63E-01	34.08%
Industrial	2.34E-01	48.89%
Gestión de residuos	8.27E-06	0.0017%
Distribución y uso	1.08E-03	0.22%
Total	4.79E-01	100%
Producción de energía		
Biodiesel	1.00E+00	100%
Total	1.00E+00	100%
Indicadores de energía		
NER	2.09	

La etapa que más consume energía es la etapa industrial principalmente por la etapa de transesterificación y esterificación (54% y 29% respectivamente). Esto se debe principalmente por los insumos en la producción de energía eléctrica, seguido de la energía utilizada durante la producción de metanol. El 16.8% del consumo de energía se concentra durante la producción de fertilizantes para la etapa agrícola. La REN es de 2.48, por lo que cumple con el requerimiento de la norma mexicana NMX-AA-174-SCFI-2015 de ser mayor a 1.5.

Análisis de ciclo de vida del biodiesel a partir de ACU

Se observa en la Tabla 41 el resumen de los productos, así como el consumo de agua fresca y la razón de energía producida a energía fósil consumida. El inventario del ciclo de vida se observa en la **Tabla 42**.

Tabla 41 Resumen de los productos e índices de eficiencia de la producción de biodiesel a partir de ACU

Parámetro	Unidades	Valor
Productos		
Biodiesel (masa)	t·a ⁻¹	1.55E+05
Biodiesel (energía)	TJ·a ⁻¹	6.16E+09
Biodiesel (volumen)	m ³ ·a ⁻¹	1.76E+05
Glicerina cruda	t·a ⁻¹	1.71E+04
K ₂ SO ₄	t·a ⁻¹	2.44E+03
Índices de eficiencia y consumo		
Consumo de agua en el ciclo de vida (WC)	m ³ ·a ⁻¹	1.33+09
<i>Masa</i>		
Razón de insumos a productos	%	86
Razón de insumos a biocombustibles	%	74
<i>Energía</i>		
Razón Neta de Energía (energía producida a energía fósil consumida)	—	2.4

Tabla 42 Inventario de ciclo de vida para la producción de biodiesel a partir de ACU por MJ de biodiesel al año

Parámetro	Unidad / MJ ⁻¹	Cantidad
Insumos		
<i>Etapas de transporte</i>		
Diésel	L	4.19E-04 ^a
Gasolina	L	7.18E-04 ^a
<i>Etapas industriales</i>		
Metanol	kg	4.55E-03
Jabón	kg	4.50E-05
KOH	kg	2.05E-04
NaOH	kg	5.52E-04
Ácido sulfúrico	kg	2.00E-04
Electricidad	kWh	1.80E-02
Agua	m ³	5.89E-03
Carbón activado	kg	1.69E-05
Resinas	kg	8.00E-06
<i>Etapas de gestión de residuos</i>		
Sólidos (huesos)	kg	9.31E-04
Aguas residuales	kg	7.17E-04
Residuos sólidos	kg	6.31E-05

Parámetro	Unidad / MJ ⁻¹	Cantidad
Etapa de distribución y uso		
Diésel	tkm	5.02E-04
Emisiones al agua		
Detergentes	kg	1.77E-05
Productos		
Biodiesel (masa)	kg	2.51E-02
Biodiesel (energía)	MJ	1.00E+00
Biodiesel (volumen)	L	2.85E-02
Glicerina cruda	kg	2.78E-03
Sulfato de potasio	kg	3.96E-04

En el Anexo XII se reportan los módulos utilizados en SimaPro para modelar las etapas de producción y distribución de los insumos.

La Tabla 43 muestra la distribución de los impactos ambientales potenciales de los escenarios estudiados entre las etapas de producción. La etapa industrial es la que más impacta en el caso del GWP, es responsable del 64% de las emisiones, donde las emisiones en la fabricación del metanol requerido durante la reacción de transesterificación y esterificación acida, en un segundo término se encuentran las emisiones generadas por la energía eléctrica. En la categoría de impacto de HTP la etapa industrial es la que más contribuye al HTP (50%) principalmente por la energía eléctrica utilizada durante la etapa industrial, en la etapa de pre-tratamiento, transesterificación y esterificación, seguido de la producción del metanol requerido en la esterificación/transesterificación. La etapa de transporte también contribuye al HTP (24%) debido principalmente por la producción de gasolina y el uso de diésel. En esta misma categoría de impacto, la etapa de distribución y uso del biodiesel también tiene una contribución significativa (17%) principalmente por el uso del biodiesel y sus emisiones de NO_x generadas. La etapa industrial es la que más contribuye al POCP (53%) debido a las emisiones generadas por la producción del metanol para la esterificación/transesterificación del ACU, mientras que la distribución y el uso del biodiesel es responsable de un 29% en esta categoría de impacto, ocasionada principalmente por las emisiones generadas de benceno y monóxido de carbono, generadas durante la combustión del biodiesel.

Los resultados de la atribución energética de todos los productos (energéticos y no energéticos) se muestran en la Tabla 43.

Tabla 43 Factores de emisión por atribución energética, referidos a 1 MJ de biodiesel y porcentajes de mitigación (ACU)

Categoría de impacto	Unidad / MJ ⁻¹	Biodiesel	Diésel	% mitigación
GWP	kg CO _{2eq}	2.23E-02	8.14E-02	73%
HTP	kg 1,4-DB _{eq}	7.83E-03	3.50E-02	78%
POCP	kg C ₂ H _{4eq}	8.51E-06	1.06E-05	20%

El sistema de bioenergía basado en ACU mitiga en los tres impactos ambientales principales: 71% en GWP, 77% HTP y 17% en POCP con respecto al sistema alternativo. Usando atribución energética, la mitigación del GWP es de 73%. De hecho, el método de atribución energética estima resultados más favorables para el sistema de bioenergía en todas las categorías de impacto ambiental.

En la Tabla 44 se observan los resultados obtenidos por expansión del sistema por ampliación, se puede observar que al comparar con expansión del sistema por expansión no hay cambio alguno.

Tabla 44. Factores de impacto calculados por expansión del sistema por ampliación, referidos por MJ de energético.

Categoría de impacto	Unidad / MJ ⁻¹	Biodiesel	Diésel	% mitigación
GWP	kg CO _{2eq}	2.33E-02	8.14E-02	71%
HTP	kg 1,4-DB _{eq}	8.14E-03	3.50E-02	76%
POCP	kg C ₂ H _{4eq}	8.82E-06	1.06E-05	16%

En la Figura 25 se observa la comparación del sistema alternativo (diésel y sulfato de potasio) con el sistema de bioenergía estudiado.

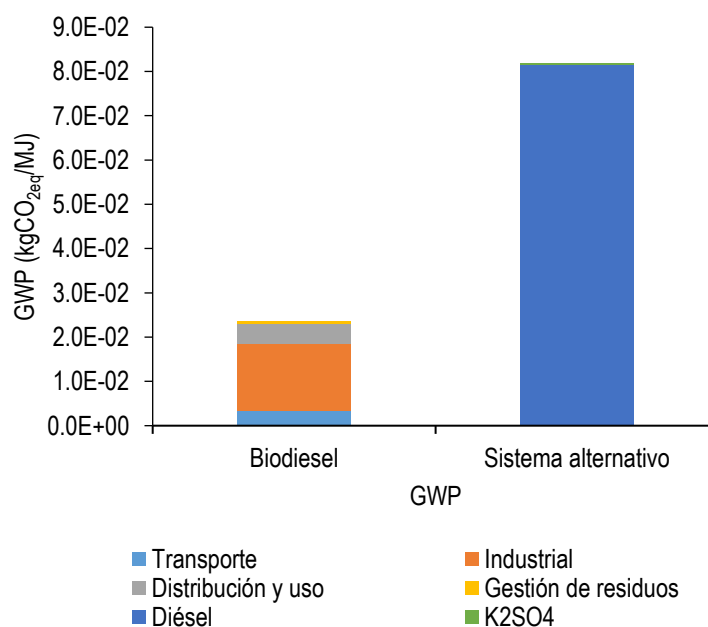


Figura 25. Distribución de los impactos ambientales potenciales en las etapas del sistema de bioenergía en el escenario estudiado (ACU)

El consumo de agua fresca a lo largo del ciclo de vida se estimó considerando tanto los datos de consumo directo (obtenidos directamente de los cuestionarios a las empresas), como

los consumos de agua asociados a los insumos de todos los procesos incluidos en los límites del sistema, tomados de la base de datos ecoinvent 3. Los resultados se muestran en la Tabla 45.

Tabla 45. Consumo de agua en el ciclo de vida del biodiesel de ACU.

Etapa	Consumo de agua / m ³ ·MJ ⁻¹	Porcentaje
Transporte	2.64E-04	0.12%
Industrial	2.15E-01	99.84%
Gestión de residuos	6.56E-05	0.03%
Distribución y uso	1.28E-05	0.01%
Total	2.16E-01	100%

El consumo mayor de agua en el ciclo de vida corresponde a la etapa industrial, principalmente por el uso de energía eléctrica durante la transesterificación (21%) y la purificación del biodiesel (44%), seguido del agua utilizada durante la producción de metanol.

La razón de energía neta (NER) resulta de la división del contenido energético en los productos y el contenido energético de todos los vectores energéticos (fósiles y no fósiles) requeridos por el sistema en su ciclo de vida, según sus poderes caloríficos inferiores (PCI). En la Tabla 46 muestra el consumo y producción de energía de la producción de biodiesel a partir de ACU. Asimismo, se muestra el valor del indicador energético descrito anteriormente.

Tabla 46. Indicadores energéticos del sistema de bioenergía en los escenarios estudiados. Cifras referidas a 1 MJ de biodiesel (ACU).

Etapa	Energía consumida / MJ·MJ ⁻¹	Porcentaje
Consumo de energía		
Transporte	5.07E-02	12.52%
Industrial	3.53E-01	87.19%
Gestión de residuos	1.10E-04	0.03%
Distribución y uso	1.08E-03	0.27%
Total	4.05E-01	100%
Producción de energía		
Biodiesel	1.00E+00	100%
Total	1.00E+00	100%
Indicadores de energía		
NER1	2.4	
NER2 (sólo biocombustibles)	2.4	

La etapa que consume más energía no renovable es la industrial con el 90.91% del consumo, donde 36.23% de la energía consumida se debe principalmente a la etapa de transesterificación para la producción de energía eléctrica, el 35.84% se debe al pretratamiento del aceite antes de transformar al biodiesel, esto se debe a la utilización de energía eléctrica y un 19% se debe a la esterificación del aceite para la producción de energía eléctrica.

Análisis de ciclo de vida del biodiesel a partir de glicerina cruda usando levaduras

Se observa en la Tabla 47 el resumen de los productos, así como el consumo de agua fresca y la razón de energía producida a energía fósil consumida. El inventario del ciclo de vida se observa en la Tabla 48.

Tabla 47 Resumen de los productos e índices de eficiencia de la producción de biodiesel a partir de levaduras

Parámetro	Unidades	Valor
Productos		
Biodiesel (masa)	t · a ⁻¹	1,94E+07
Biodiesel (energía)	MJ · a ⁻¹	7,66E+08
Biodiesel (volumen)	m ³ · a ⁻¹	2,20E+07
K ₂ SO ₄	t · a ⁻¹	1,94E+07
Índices de eficiencia y consumo		
Consumo de agua en el ciclo de vida (WC)	m ³ · a ⁻¹	6.05E+07
Energía		
Razón Neta de Energía	—	1.96

Tabla 48 Inventario de ciclo de vida para la producción de biodiesel a partir de levaduras por MJ de biodiesel al año

Parámetro	Unidad / MJ⁻¹	Cantidad
Insumos		
<i>Etapas industrial</i>		
Glicerina	kg	1.21E-01
Biomasa	kg	4.12E-05
(NH ₄) ₂ SO ₄	kg	8.12E-02
Metanol	kg	2.84E-03
Aire	kg	2.27E-01
KOH	kg	5.88E-04
NaOH	kg	5.23E-04
Ácido sulfurico	kg	2.52E-04
Electricidad	kWh	5.76E-03
Agua	m ³	2.52E-03
<i>Etapas de gestión de residuos</i>		
Aguas residuales	kg	1.89E-01
<i>Etapas de distribución y uso</i>		
Diésel	L	5.02E-04
Productos		
Biodiesel (masa)	kg	2.53E-02
Biodiesel (energía)	MJ	1.00E+00
Biodiesel (volumen)	L	2.87E-02
Sulfato de potasio	kg	4.28E-04

En el Anexo XIII se reportan los módulos utilizados en SimaPro para modelar las etapas de producción y distribución de los insumos.

La Figura 26 muestra la distribución de los impactos ambientales potenciales de los escenarios estudiados entre las etapas de producción. La etapa industrial es la que más impacta en el caso del GWP, es responsable del 81.93% de las emisiones, donde las emisiones en la fabricación de sulfato de amonio y metanol requerido durante la reacción de transesterificación y esterificación acida, en un tercer término se encuentran las emisiones generadas por la energía eléctrica. En la categoría de impacto de HTP la etapa industrial es la que más contribuye al HTP (82.19%) principalmente por la producción y uso del sulfato de amonio, seguido de la producción del metanol requerido en la esterificación/transesterificación. La etapa de distribución y uso contribuye al HTP (15.20%) principalmente por el uso del biodiesel y sus emisiones de NO_x generadas. La etapa industrial es la que más contribuye al POCP (75.21%) debido a las emisiones generadas por la producción y uso del sulfato de amonio y en segundo término el metanol para la esterificación/transesterificación del ACU, mientras que la distribución y el uso del biodiesel es responsable de un 22.06% en esta categoría de impacto, ocasionada principalmente por las emisiones generadas de benceno y monóxido de carbono, generadas durante la combustión del biodiesel.

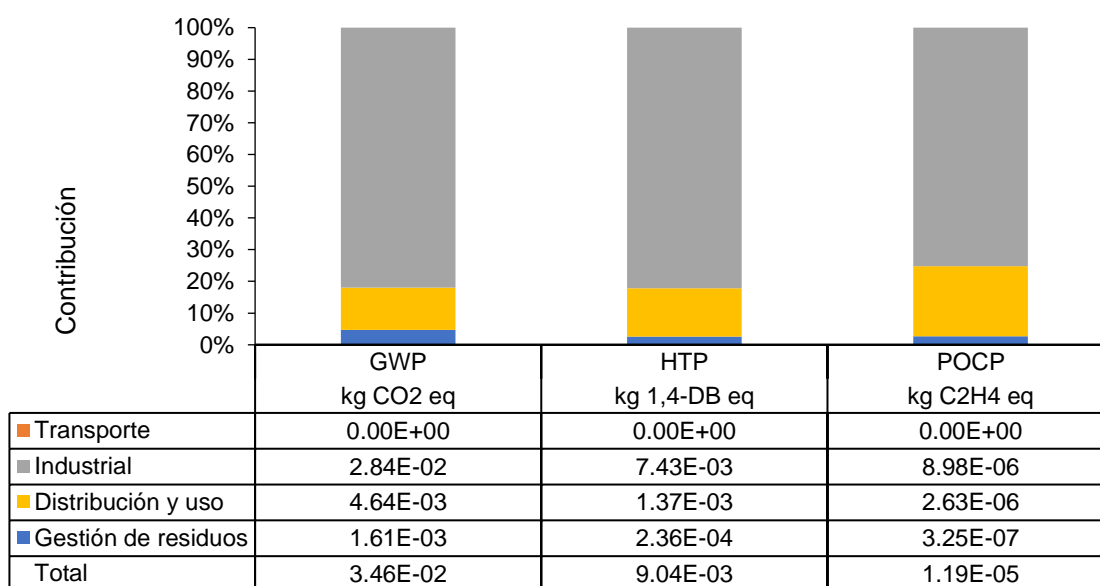


Figura 26. Distribución y valores totales de los impactos ambientales potenciales en las categorías GWP, HTP y POCP (ACU).

En la

Figura 27 se observa que la etapa industrial es la mayoritaria en casi todas las categorías de impacto (99% ADP, 95% ADP fósil, 96% ODP, 90% MWEF y 94 FWEF), aportando casi la totalidad del impacto en la categoría ADP. Los insumos o procesos que provocan esta

predominancia de la etapa industrial es el proceso de fermentación debido a la producción de sulfato de amonio de igual manera se le atribuye a la etapa de transesterificación debido a la producción de metanol y energía eléctrica utilizados durante esta etapa. En la categoría de impacto TEP el 44.91% se debe a la etapa industrial debido a la producción de sulfato de amonio y metanol, mientras que el 53.74% se debe a la etapa de distribución y uso. En las categorías de impacto AP y EP, la etapa de la distribución y el uso del biodiesel representa un 64% y 75%, respectivamente, debido a las emisiones generadas en la combustión del biodiesel.

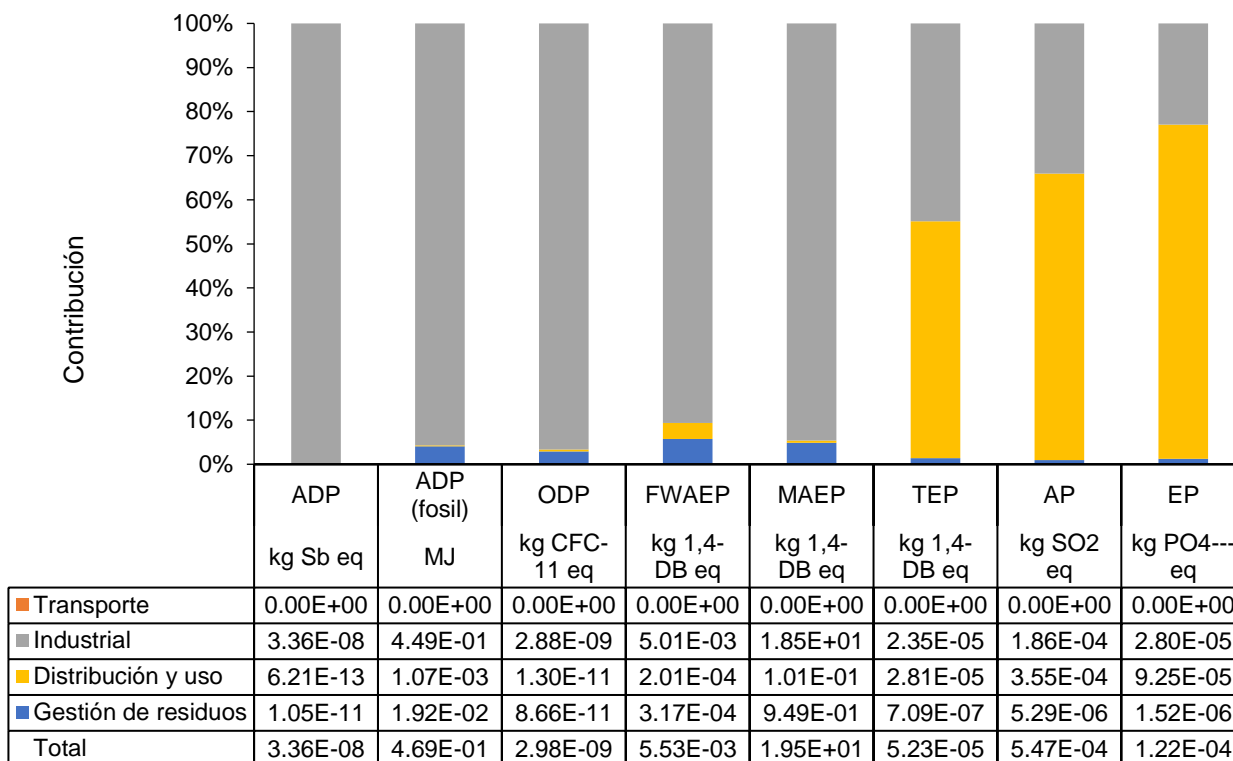


Figura 27. Distribución de los impactos ambientales potenciales en las etapas del sistema de bioenergía en el escenario estudiado (levaduras)

La Tabla 49 muestra el potencial de mitigación ambiental de la producción de biodiesel a partir de levaduras por expansión del sistema por ampliación. El biodiesel a partir de levaduras tiene el potencial de mitigar el GWP (58%) y HTP (74%), sin embargo, a un incremento de un 9% en la categoría de impacto de POCP.

Tabla 49 Factores de emisión por expansión del sistema por ampliación (levaduras)

Categoría de impacto	Unidad / MJ ⁻¹	Biodiesel	Sistema alternativo	% mitigación ¹
GWP	kg CO _{2eq}	3.46E-02	8.46E-02	59%
HTP	kg 1,4-DB _{eq}	9.04E-03	3.71E-02	76%
POCP	kg C ₂ H _{4eq}	1.19E-05	1.16E-05	-2%

Los resultados de la atribución energética de todos los productos (energéticos y no energéticos) se muestran en la Tabla 50.

Tabla 50 Factores de emisión por atribución energética, referidos a 1 MJ de biodiesel y porcentajes de mitigación (levaduras)

Categoría de impacto	Unidad / MJ ⁻¹	Biodiesel	Diésel	% mitigación
GWP	kg CO _{2eq}	3.46E-02	8.46E-02	59%
HTP	kg 1,4-DB _{eq}	9.04E-03	3.71E-02	76%
POCP	kg C ₂ H _{4eq}	1.19E-05	1.16E-05	-2%

El sistema de bioenergía basado en levaduras mitiga en los impactos ambientales de: GWP y HTP con respecto al sistema alternativo. Usando atribución energética, la mitigación del GWP es de 59% de hecho, el método de atribución energética no cambia debido a que la glicerina cruda es utilizada para la producción de biodiesel por lo que todos los impactos se le atribuyen al biodiesel.

En la Figura 28 se observa la comparación del sistema alternativo (diésel y sulfato de potasio) con el sistema de bioenergía estudiado.

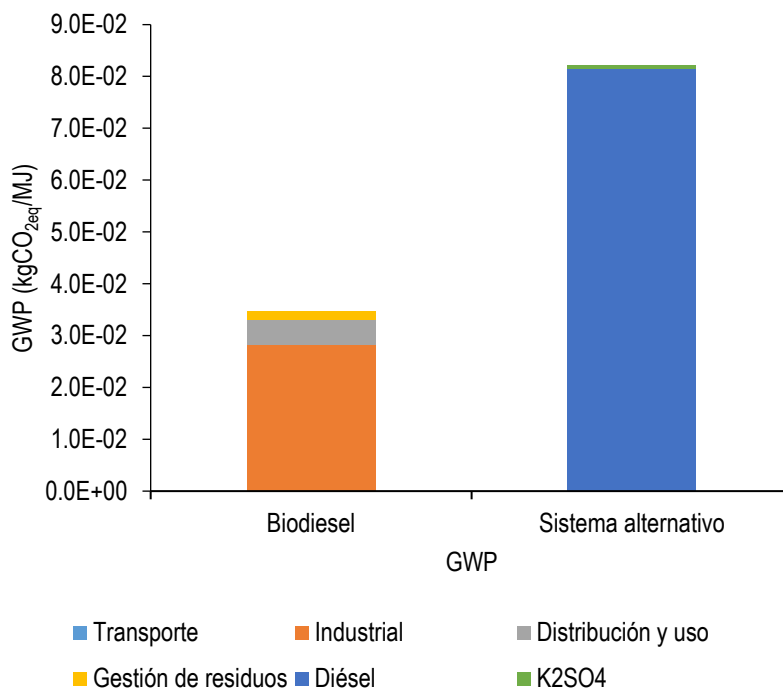


Figura 28. Distribución de los impactos ambientales potenciales en las etapas del sistema de bioenergía en el escenario estudiado (levaduras)

El consumo de agua fresca a lo largo del ciclo de vida se estimó considerando tanto los datos de consumo directo (obtenidos directamente de los cuestionarios a las empresas), como los consumos de agua asociados a los insumos de todos los procesos incluidos en los límites del sistema, tomados de la base de datos ecoinvent 3. Los resultados se muestran en la Tabla 51.

Tabla 51. Consumo de agua en el ciclo de vida del biodiesel de ACU.

Etapa	Consumo de agua / m ³ ·MJ ⁻¹	Porcentaje
Transporte	0.00E+00	0.00%
Industrial	7.29E-02	92.39%
Gestión de residuos	5.99E-03	7.59%
Distribución y uso	1.28E-05	0.02%
Total	7.89E-02	100.00%

El consumo mayor de agua en el ciclo de vida corresponde a la etapa industrial, principalmente durante la fermentación, principalmente por la producción de sulfato de amonio.

La razón de energía neta (NER) resulta de la división del contenido energético en los productos y el contenido energético de todos los vectores energéticos (fósiles y no fósiles)

requeridos por el sistema en su ciclo de vida, según sus poderes caloríficos inferiores (PCI). En la Tabla 52 muestra el consumo y producción de energía de la producción de biodiesel a partir de levaduras. Asimismo, se muestra el valor del indicador energético descrito anteriormente.

Tabla 52. Indicadores energéticos del sistema de bioenergía en los escenarios estudiados. Cifras referidas a 1 MJ de biodiesel (levaduras).

Etapa	Energía consumida / MJ·MJ ⁻¹	Porcentaje
Consumo de energía		
Transporte	0.00E+00	0.00%
Industrial	4.88E-01	95.56%
Gestión de residuos	2.16E-02	4.23%
Distribución y uso	1.08E-03	0.21%
Total	5.11E-01	100%
Producción de energía		
Biodiesel	1.00E+00	100%
Total	1.00E+00	100%
Indicadores de energía		
NER1	1.96	
NER2 (sólo biocombustibles)	1.96	

La etapa que consume más energía no renovable es la industrial con el 95.56% del consumo, donde 71% de la energía consumida se debe principalmente a la etapa de fermentación, especialmente de la energía requerida durante la producción de sulfato de amonio.

Resultado del análisis beneficio/costo

En esta sección se reportan los resultados obtenidos en el análisis beneficio/costo para cada ruta tecnológica estudiada.

Análisis beneficio/costo, biodiesel a partir de aceite de palma

En un año en promedio se puede obtener 1,508,494 m³ de biodiesel en el país en los estados de Chiapas, Campeche, Tabasco y Veracruz. En la Tabla 53 se observa el beneficio de producto bruto por las ventas durante un año.

Tabla 53 Beneficios obtenidos por las ventas

Productos	Cantidad	Unidad	\$ Unidad-1	BPB (Mdp)
Biodiesel	1.51E+09	L	17	25,644
Glicerina	1.23E+08	L	2	245
K ₂ SO ₄	2.22E+07	kg	33	732

En la Tabla 54 se observa el costo total de producción para la producción de biodiesel durante un año a nivel nacional.

Tabla 54 Costo total de producción

	Cantidad	Unidad	\$ unidad⁻¹	costo total
Racimos de fruta fresca de palma	7.16E+06	t	2,140	15319.97
metanol	1.96E+08	L	12.32	2415.77
KOH	1.43E+07	kg	87	1243.12
NaOH	2.72E+07	kg	41.6	1131.83
H2SO4	7.20E+06	L	8.68	62.49
Carbón activado	8.32E+05	kg	270	224.71
Resinas lónicas	3.93E+05	kg	48.45	19.06
Diésel	1.21E+07	L	19.6	236.53
electricidad	8.82E+08	kWh	1.2	1057.90
Mantenimiento y reparaciones				33.68
Gasto de mano de obra		1338 obrero al mes	4,430	71.13
				21,816
				Costo variable de producción
Renta				56.14
Financiamiento				1049.06
Impuestos		0,07	0,07	0.07
Administración				19.11
				1,126
				Costo fijo de producción
				22,942
				Costo total de producción

En la Figura 29 se observa la distribución del CVP, se observa que el 70.2% de estos, se debe a la obtención de racimos de fruto fresca, que incluyen todos los gastos agrícolas.

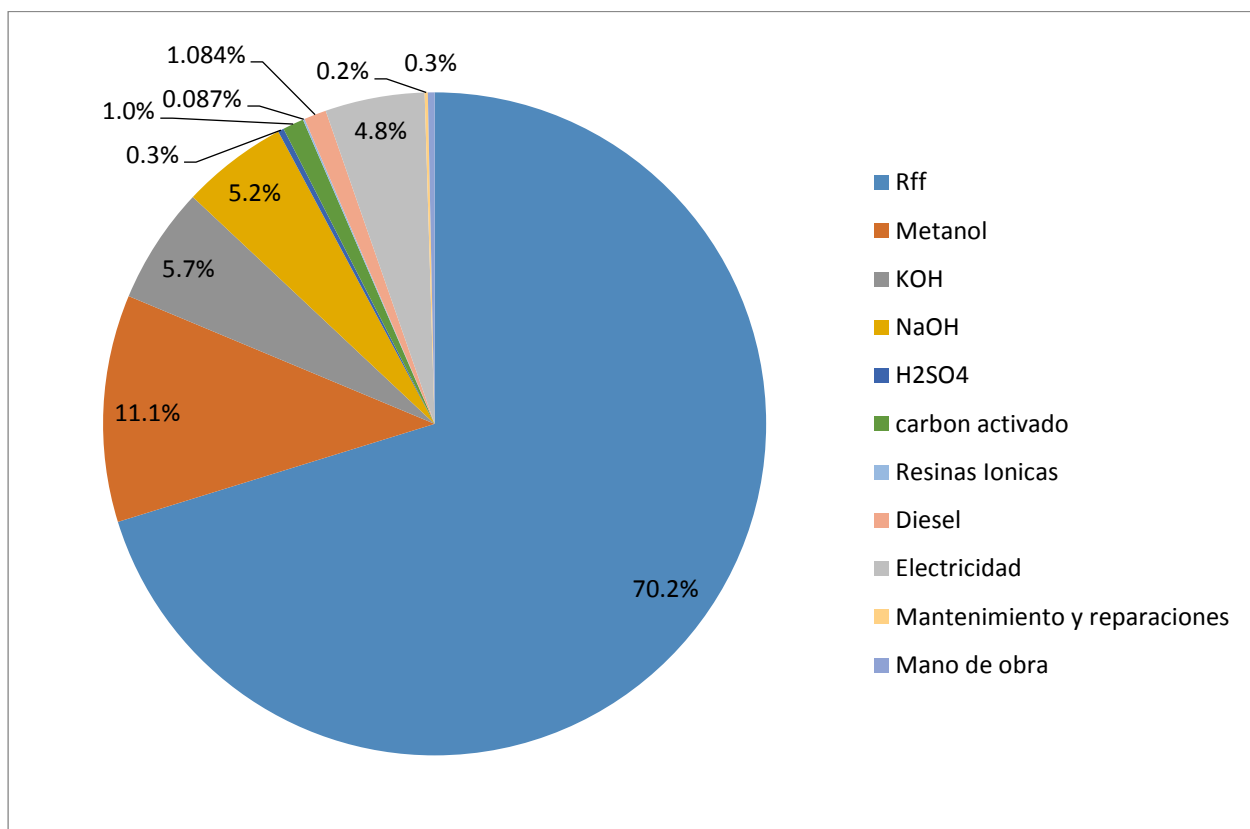


Figura 29 Distribución del CVP en la producción de biodiesel a partir de palma de aceite

En la Tabla 55 se observa los resultados obtenidos del análisis económico realizado para la producción de biodiesel a partir de aceite de palma.

Tabla 55 Análisis económico de la producción de biodiesel a partir de palma de aceite

Costo y componentes de	Unidad	Valor Mdp
retorno		
BPB	\$ productos ⁻¹	26,622
CVP	\$ productos ⁻¹	21,816
CFP	\$ productos ⁻¹	1,126
CTP	\$ productos ⁻¹	22,942
Retorno bruto	\$ productos ⁻¹	4,806
Retorno neto	\$ productos ⁻¹	3,680
BC	-	1.16

El costo total para la producción de biodiesel durante un año a nivel nacional, con 330 días de trabajo, fue de 22,942 MDP, el costo más alto en el CVP es la materia prima, el 70% representado por la obtención de racimos de fruta fresca (incluyen todos los gastos agrícolas). La relación beneficio/ costo resultó de 1.16. En estos cálculos se consideró la inversión inicial anualizando a un año, en la Tabla 56 se observa el costo de financiamiento.

Tabla 56 Costo total de la inversión de la producción de biodiesel a partir de aceite de palma

Costos directos	Costo en Mdp
Costo total de equipos	1192
Entrega de los equipos	119
Instalación de los equipos	512
Instrumentación y control	341
bombas	407
Sistema eléctrico	131
Construcción incluida los servicios	380
terreno	157
Instalación de los servicios	721
Costo directo total	3961
Costos indirectos	
Ingeniería y supervisión	420
Gastos de construcción	446
Gastos legales	52
Tarifa del contratista	249
Contingencia	485
Costo indirecto total	1653
Capital fijo de inversión	5614
Capital de trabajo	1167
Capital total de la inversión industrial	6781

Considerando el capital de la inversión inicial de 6,781 Mdp, únicamente de la etapa industrial (la extracción del aceite, la transformación a biodiesel y la combustión), puesto que para el análisis económico se considera la compra de los racimos de fruta fresca, el costo de la inversión inicial de la etapa agrícola no se toma en cuenta (la adquisición de las hectáreas y el establecimiento de las plantas), se calculó el capital de la inversión anualizado, para esto se consideró un préstamo a 25 años con una tasa de interés del 15% (Tasa de interés fija por bancos mexicanos). El capital anualizado es de 1049 Mdp.

De acuerdo a un estudio realizado en Tailandia (Silalertruksa, Bonnet, & Gheewala, 2012), el precio de la materia prima es lo que determina la rentabilidad del biodiesel. De acuerdo a este estudio, los racimos de fruta fresca representan el 88% del costo total de producción

(Silalertruksa et al., 2012). Al comparar con los resultados obtenidos del biodiesel a partir de aceite de palma en México, los racimos de fruta fresca representan el 70% del costo total de producción. El estudio realizado por (Silalertruksa et al., 2012) determinó que la promoción de remplazar el diésel por el biodiesel es económicamente factible contribuyendo una ganancia de 0.01 y 0.76 THB (Bath tailandés) por litro, siempre y cuando se utilicen mezclas B5 y B10 (5% de biodiesel y 10% de biodiesel) respectivamente (Silalertruksa et al., 2012) cabe mencionar que en el 2012 un dólar era igual a 31.73 THB, por lo que las ganancias por cada litro de biodiesel resultaron en 0.0003 dólares y 0.023 dólares para B5 y B10 respectivamente. El estudio elaborado para la producción de biodiesel en México determino que por cada litro de biodiesel es posible obtener una ganancia de 2.43 pesos equivalente a 0.12 dólares por litro fijando un precio de venta de 17 pesos, considerando aproximadamente dos pesos menos de venta con el diésel que se vende en el país.

Análisis beneficio/costo, biodiesel a partir de ACU

Para obtener biodiesel a partir de ACU es necesario establecer 22 plantas industriales de diferentes capacidades, en un año en promedio se pueden obtener 175,946 m3 de biodiesel, en la Tabla 57 se observa el beneficio de producto bruto por las ventas durante un año.

Tabla 57 Beneficios obtenidos por las ventas de biodiesel a partir de ACU

Productos	Cantidad	Unidad	\$ unidad-1	BPB (Mdp)
Biodiesel	1.76E+08	l	17	2991
Glicerol	1.32E+07	l	2	26
K ₂ SO ₄	2.44E+06	kg	33	81
Total pesos				3098

En la Tabla 58 se observa el costo total de producción para la producción de biodiesel a partir de ACU durante un año.

Tabla 58 Costo total de producción de biodiesel a partir de ACU

	Cantidad	Unidad	\$ unidad ⁻¹	costo total
ACU	1.96E+08	l	8.12	1592.096
Metanol	3.18E+07	l	12.32	392.144
KOH	1.57E+06	kg	87	136.736
NaOH	3.20E+06	kg	41.6	133.169
H ₂ SO ₄	8.35E+05	L	8.68	7.244
Carbón activado	1.04E+05	kg	270	28.192
Resinas Iónicas	4.94E+04	kg	48.45	2.392

electricidad	2.54E+07	kWh	1.2	30.455
Diésel	1.41E+06	L	19.6	27.588
Mantenimiento y reparaciones				1.853
Gasto de mano de obra	198	obrero al mes	4,430	10.526
Costo variable de producción				2,310
Renta				3.09
Financiamiento				46.02
Impuestos				0.29
Administración				2.66
Costo fijo de producción				2.95
Costo total de producción				2,313

En la Figura 30 se observa la distribución del CVP, se observa que el 67.4% de estos, se debe a la recolección del ACU.

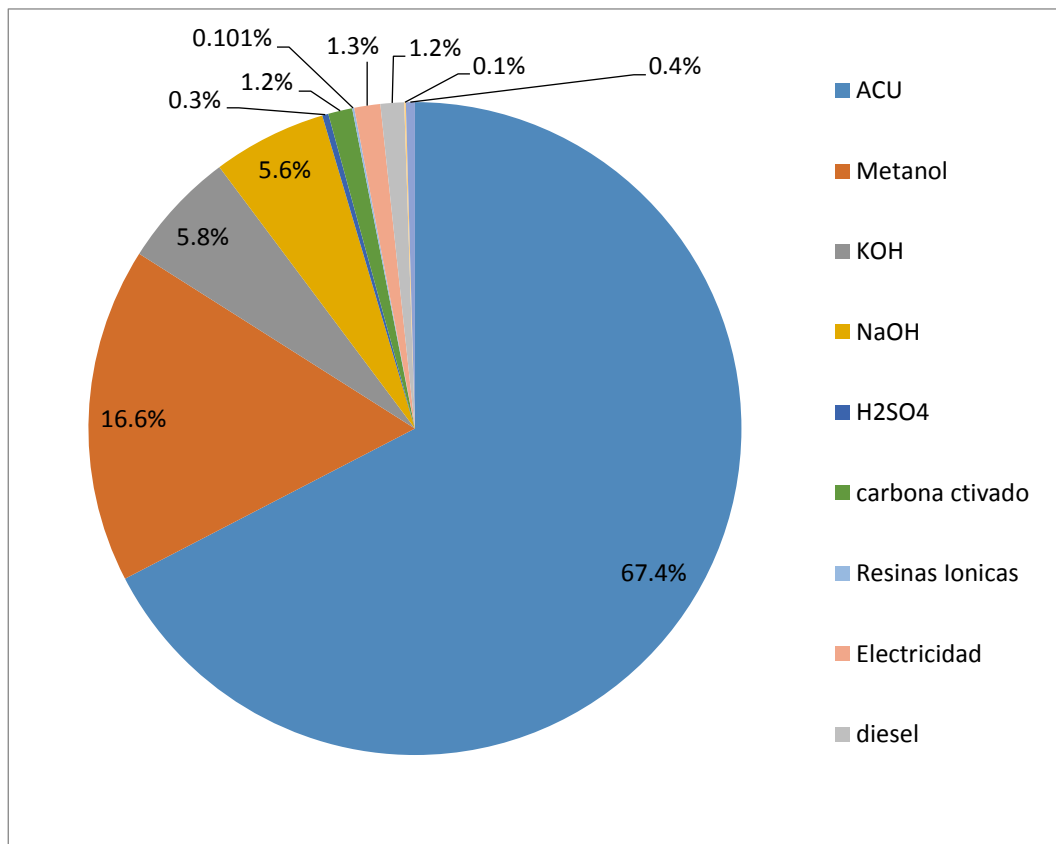


Figura 30 Distribución del CVP en la producción de biodiesel a partir de ACU

En la Tabla 59 se observa los resultados obtenidos del análisis económico realizado para la producción de biodiesel a partir de ACU.

Tabla 59 Análisis económico de la producción de biodiesel a partir de ACU

Costo y componentes de		
retorno	Unidad	Valor Mdp
BPB	\$ productos ⁻¹	3,098
CVP	\$ productos ⁻¹	2,362.39
CFP	\$ productos ⁻¹	51.87
CTP	\$ productos ⁻¹	2,414.27
Retorno bruto	\$ productos ⁻¹	735.70
Retorno neto	\$ productos ⁻¹	683.83
BC	-	1.28

El costo total para la producción de biodiesel durante un año, considerando 22 plantas industriales de diferentes capacidades, fue de 2,414.27 Mdp. El costo más alto en el CVP es la materia prima, el 67.4% representado por la obtención de ACU. La relación beneficio/ costo resultó de 1.28 por lo que el proyecto es rentable (mayor a la unidad). Se calculó el capital de la inversión anualizado, para esto se consideró un préstamo a 25 años con una tasa de interés del 15% (Tasa de interés fija por bancos mexicanos). El capital anualizado es de 46 Mdp. En la Tabla 60 se observa el costo de capital de inversión.

Tabla 60 Costo total de la inversión de la producción de biodiesel a partir de ACU

Costos directos	Costo en Mdp
Costo total de equipos	66
Entrega de los equipos	7
Instalación de los equipos	28
Instrumentación y control	19
bombas	22
Sistema eléctrico	7
Construcción incluida los servicios	21
terreno	9
Instalación de los servicios	40
Costo directo total	218
Costos indirectos	
Ingeniería y supervisión	23
Gastos de construcción	25
Gastos legales	3
Tarifa del contratista	14
Contingencia	27
Costo indirecto total	91
Capital fijo de inversión	309

De acuerdo con un estudio realizado por Sheinbaum-Pardo y colaboradores (2013) el precio unitario del biodiesel a partir de ACU resultó de 0.81 dólares por litro de biodiesel a 1.36 dólares por litro, en México, esto depende del precio de adquisición de ACU. El precio de diésel para el 2013 fue 0.8 dólares por litro (el dólar en el 2012 estaba a 13.58) (Sheinbaum-Pardo, Calderón-Irazoque, & Ramírez-Suárez, 2013). Durante el 2012 el litro de diésel fue de 11 pesos, por lo que producir biodiesel a partir de ACU durante el 2012 costaba de 11 a 18.46 pesos igualando el precio del combustible fósil. Este estudio determinó que el precio del ACU adquirido, así como la etapa de recolección de ACU son los causantes de que los precios de biodiesel de ACU sean mayores al precio del diésel y por lo tanto el proyecto de inversión no resulte ser rentable (Sheinbaum-Pardo et al., 2013). Actualmente el precio de diésel varía entre 18 a 20 pesos el litro, para fines de este estudio se fijó un precio de biodiesel inferior a dos pesos del valor más alto de diésel, en 17 pesos el litro, cabe mencionar que el 67% del costo variable de producción depende de la adquisición del ACU, con respecto al costo unitario de biodiesel el ACU representa el 47% del costo, con un valor de 8 pesos el litro (Dato recabado de empresas establecidas en el país).

Análisis beneficio/costo, biodiesel a partir de glicerina cruda usando levaduras

Se consideró que la planta transformadora de aceite para la obtención de biodiesel se lleve a cabo en las plantas de producción de biodiesel a partir de aceite de palma y de ACU. De las proyecciones descritas anteriormente se obtuvo que durante el periodo comprendido del 2016 al 2040 en promedio se puede obtener 107,824 m³ de glicerina cruda, durante el periodo comprendido del 2016 al 2040, lo que resulta en producciones anuales de 21,996 m³ de biodiesel, donde el 21% corresponde a la glicerina cruda obtenida durante la producción de biodiesel a partir de ACU, mientras que el resto del aceite de palma.

Para obtener los costos de producción de biodiesel a partir de aceite de levaduras, reutilizando la glicerina cruda del aceite de palma y ACU se consideró:

- La glicerina cruda ya no es considerada un producto de venta
- Toda la glicerina cruda se usa como sustrato
- Se incrementa la capacidad de las empresas propuestas para el biodiesel a partir de aceite de palma y ACU, debido al biodiesel adicional producido a partir de levaduras.
- El análisis beneficio/costo es con base en el incremento de la producción de biodiesel a partir de levaduras.

En la Tabla 61 se observa el beneficio de producto bruto por las ventas durante un año en la producción de biodiesel a partir de levaduras.

Tabla 61 Beneficios obtenidos por las ventas (biodiesel a partir de levaduras)

Productos	Cantidad	Unidad	\$ unidad ⁻¹	BPB (Mdp)
Biodiesel	2.20E+07	l	17	373.93
K ₂ SO ₄	4.28E+04	kg	33	1.41
			Total pesos	375.34

Mdp significa millones de pesos

En la Tabla 62 se observa el costo total de producción para la producción de biodiesel a partir de aceite de palma y ACU durante un año, sin considerar la venta de glicerina.

Tabla 62 Beneficios obtenidos por las ventas de biodiesel a partir de aceite de palma y ACU, reutilizando la glicerina

Productos	BPB (Mdp)
Biodiesel	28635.48
K ₂ SO ₄	812.88
Total	29,448.36

Con la producción adicional de biodiesel a partir de levaduras del 2% hay un incremento en las ventas del 1.3%. Al incrementar la producción, incrementa el costo total de producción, se consideró el incremento de materias primas, energía, trabajadores, entre otros, por el incremento de la producción de biodiesel a partir de levaduras como se observa en la Tabla 63.

Tabla 63 Costo total de producción

	unidad	\$ unidad ⁻¹	Cantidad	costo total
Metanol	l	12.32	1.18E+08	1421.06
KOH	kg	87	5.21E+06	64.23
NaOH	kg	41.6	8.58E+05	74.61
Tratamiento de aguas residuales	L	4.64	7.64E+05	31.77
H ₂ SO ₄	L	8.68	2.76E+08	1278.88
Carbón activado	kg	270	2.00E+05	1.73
Resinas				
Iónicas	Kg	48.454	2.47E+04	6.67
Diesel	L	19.6	1.17E+04	0.57

Sulfato de amonio	kg	17	1.05E+06	20.52
Electricidad	kWh	1.2	8.41E+06	10.09
Mantenimiento y reparaciones				1.85
Mano de obra obrero	al mes	4430		2.66
Costo variable de producción				2,914.62
Renta				15.00
Financiamiento				0.29
Impuestos				0.88
Administración				
Costo fijo de producción				16.19
Costo total de producción				2,930.81

En el costo fijo, el costo por concepto de renta no se consideró, puesto que se consideró que el sitio de producción es en las mismas plantas de biodiesel existentes. Se puede observar que una industria que trate únicamente la venta de biodiesel a partir de levaduras no es rentable, puesto que el CTP es de 2,930.81 Mdp, mientras que el beneficio bruto es de 375.34 Mdp. Cuando se incluye la producción de biodiesel a partir de levaduras en los sistemas que producen biodiesel a partir de aceite de palma y ACU, el CTP incrementa un 10% y las ganancias en 1.3%. En la Tabla 64 se observa el CTP incluyendo las tres rutas tecnológicas estudiadas.

Tabla 64 CTP en sistemas combinados en la producción de biodiesel

Costos	Costo total Mdp
CVP	27,093.21
CFP	1,194.29
CTP	28,287.49

En la Figura 31 se observa la distribución del CVP únicamente de la producción de biodiesel usando levaduras, se observa que el 48.8% se debe a la utilización de sulfato de amonio como fuente de nitrógeno.

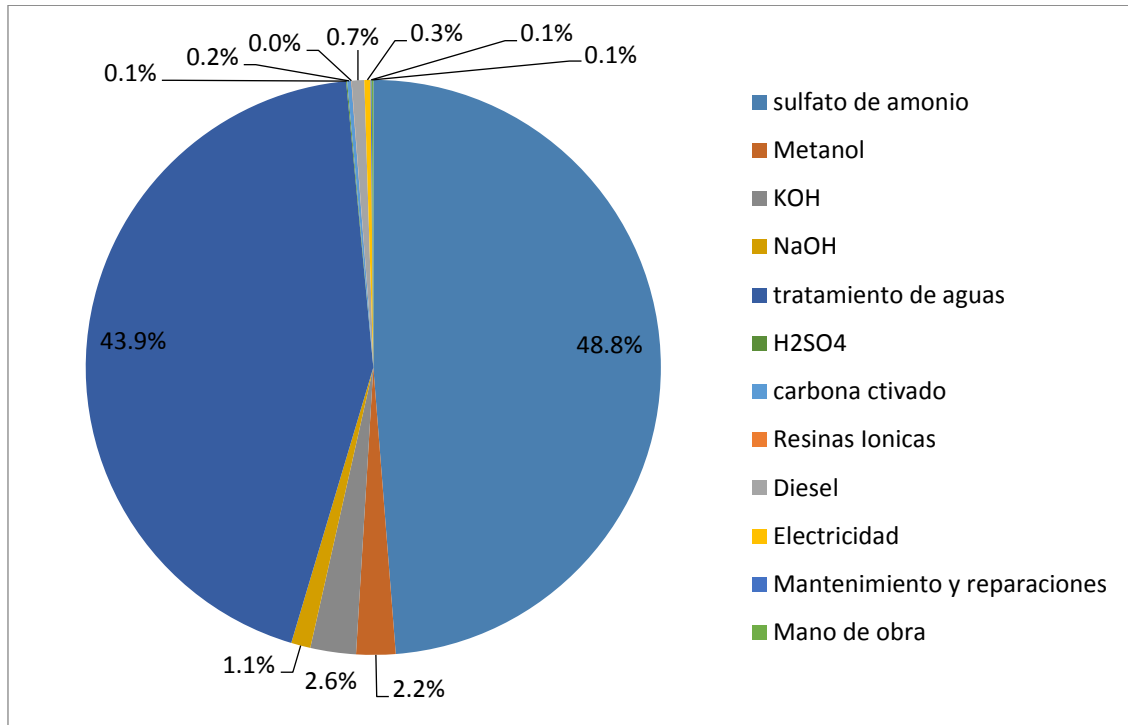


Figura 31 Costo variable de producción de biodiesel a partir de levaduras

Con respecto a la inversión, se consideró un incremento en las plantas industriales de un 0.2%. En la Tabla 65 se observa el costo de inversión para producir biodiesel usando levaduras.

Tabla 65 Costo total de la inversión de la producción de biodiesel a partir de levaduras

Costos directos	Costo en Mdp
Costo total de equipos	21
Entrega de los equipos	2
Instalación de los equipos	9
Instrumentación y control	6
bombas	7
Sistema eléctrico	2
Construcción incluida los servicios	7
terreno	3
Instalación de los servicios	13
Costo directo total	69
Costos indirectos	

Ingeniería y supervisión	7
Gastos de construcción	8
Gastos legales	1
Tarifa del contratista	4
Contingencia	8
Costo indirecto total	29
Capital fijo de inversión	97
Capital de trabajo	20
Capital total de la inversión industrial	118

El capital total de la inversión corresponde a 118 Mdp, recordando que el capital de la inversión para establecer las industrias a partir del aceite de palma es de 6,781 Mdp, mientras que el capital de la inversión para ACU es de 375 Mdp. al usar la glicerina cruda como sustrato incrementa en un 0.2%. Anualizando el capital de inversión, se consideró un préstamo a 25 años con una tasa de interés del 15%. En la Tabla 66 se observa los resultados obtenidos del análisis económico realizado para la producción de biodiesel incluyendo la producción de biodiesel a partir de levaduras.

Tabla 66 Análisis económico de la producción de biodiesel a partir de ACU

Costo y componentes de		
retorno	Unidad	Valor
BPB	\$ productos ⁻¹	29,824
CVP	\$ productos ⁻¹	27,093.21
CFP	\$ productos ⁻¹	1,194.29
CTP	\$ productos ⁻¹	28,287.49
Retorno bruto	\$ productos ⁻¹	2,730.50
Retorno neto	\$ productos ⁻¹	1,536.21
BC	-	1.05

De acuerdo a estos resultados el costo total para la producción de biodiesel durante un año, incluyendo a la producción de biodiesel a partir de levaduras, usando como sustrato glicerina cruda, fue de 28,287.49 Mdp. La relación beneficio/ costo resultó de 1.05 por lo que el proyecto es rentable (mayor a la unidad).

Un estudio realizado por Koutinas y colaboradores (2014) reporta una simulación para determinar el costo total de producción de biodiesel usando levaduras, determinando que el 80% del costo total de producción se debe a la adquisición del sustrato. Ellos usaron como sustrato glucosa y la levadura fue *Rhodospiridium toruloides* (Koutinas et al., 2014). Cabe mencionar que, en el caso de estudio de la producción de biodiesel a partir de levaduras en México, se usó *Yarrowia lipolyticay* el sustrato fue glicerina cruda. De igual manera, puesto que es una tecnología emergente no hay muchos estudios comparables con las mismas características y mucho menos

que hablen de costo total de producción e inversiones. El estudio de Koutinas determinó que el 16% del costo total de producción se debe a la fermentación y extracción de la levadura (en un proceso batch) y el precio unitario de biodiesel es de 5.9 dólares/kg biodiesel (5.22 dólares el litro de biodiesel), el precio del dólar durante el 2014 fue alrededor de 13.40 pesos, por lo que producir biodiesel usando levaduras resultó de 69 pesos (Koutinas et al., 2014). El estudio realizado a partir de *Yarrowia lipolytica* determinó el precio de biodiesel en 65 pesos el litro. Sin embargo, si el proyecto de inversión se considera como parte de una biorrefinería, el precio de biodiesel puede mantenerse a 17 pesos, incrementando las ganancias en 1.3% y el costo total de producción en un 10%. Cabe mencionar que la reutilización de la glicerina cruda ayudaría a resolver el problema que tienen actualmente las empresas por la sobreoferta de glicerina cruda.

Una variable clave en la producción de biodiesel a partir de levaduras son los rendimientos de la biomasa con respecto al sustrato, por lo que se realizó un análisis comparando como se ve afectada la relación beneficio/costo con respecto al rendimiento de la biomasa con respecto al sustrato, como se observa en la Figura 32 la relación B/C es mayor que la unidad cuando el rendimiento de biomasa es igual o mayor a 0.57 g biomasa/g sustrato.

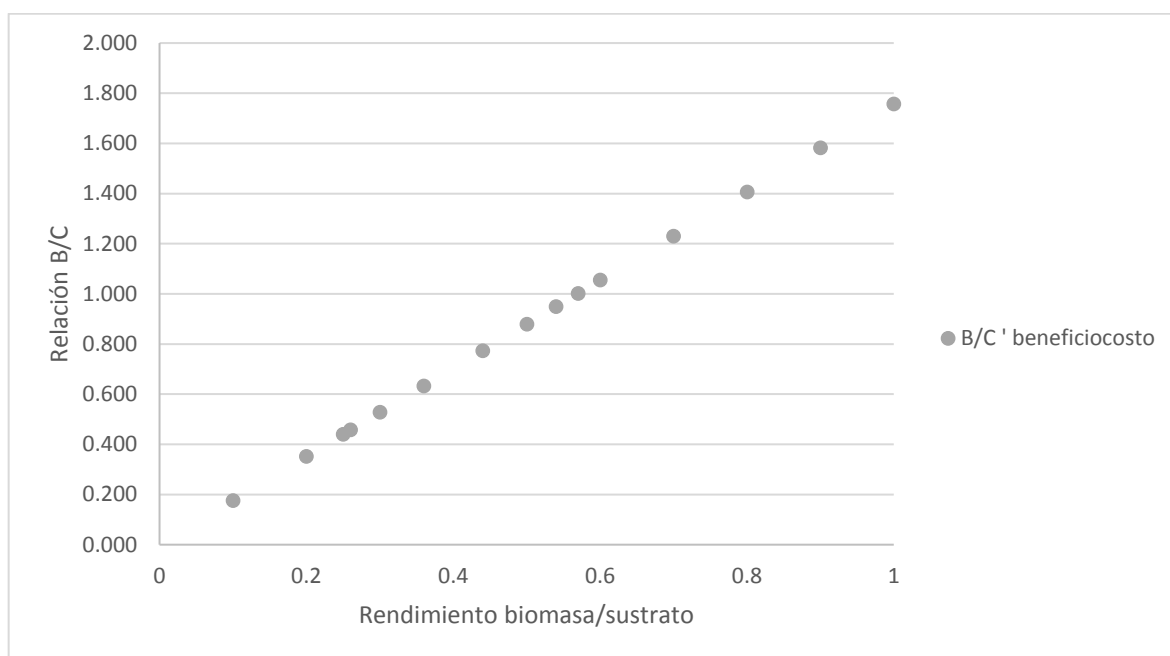


Figura 32 Análisis de la relación B/C con respecto a los rendimientos de la biomasa

La producción de biodiesel a partir de levaduras, depende de la concentración de la biomasa con respecto al sustrato. La producción de biodiesel a partir de levaduras solo es posible en un sistema de biorrefinería. Actualmente la tecnología disponible para producir biodiesel es en lotes con capacidad de 400 a 8000l, puesto que la producción de glicerina cruda corresponde a un 10% masa de la producción de biodiesel, en una empresa con producción diaria de 8000 l, el bioerreactor para obtener levaduras usando como sustrato glicerina seria de 5000 l aproximadamente. Actualmente los datos obtenidos son a escala piloto de 200 l. Es necesario que los rendimientos sean mayores a 0.57 g biomasa/g sustrato.

Comparación de rutas tecnológicas

México tiene oportunidades técnicas para la producción de biodiesel a partir de aceite de palma, ACU y levaduras. Durante el periodo comprendido del 2016 al 2040 es posible producir 1,508,494 m³ de biodiesel a partir de aceite de palma, estableciendo 6 plantas industriales en los estados de Chiapas, Campeche, Tabasco y Veracruz. Sin embargo, es necesario que el país satisfaga la creciente demanda nacional de aceite de palma, para no comprometer el aceite destinado a la alimentación, para ello es necesario sembrar aproximadamente cada año 75,432 ha.

Con respecto al ACU es posible recolectar (en 15 zonas metropolitanas del país) 195,742 m³ anuales de ACU lo que resulta en producciones anuales de 175,946 m³ de biodiesel, estableciendo 22 empresas. Puesto que uno de los inconvenientes con respecto a la producción de biodiesel es la disposición de glicerina cruda, esta puede ser reutilizada y transformada con levaduras a biodiesel, cada empresa podría aumentar un 1.3% la productividad de biodiesel, Con la glicerina cruda (107,824 m³) obtenida en las empresas propuestas es posible producir anualmente 21,996 m³ de biodiesel. Con estas proyecciones, de las tres rutas tecnológicas estudiadas es posible satisfacer 4.15% de la demanda interna de diésel del país, que corresponde al 13.65% de las importaciones.

Con respecto al ACV se obtuvo que las tres rutas potenciales son capaces de mitigar en la categoría de impacto de GWP y HTP, sin embargo, en la categoría de POCP hay un incremento del 47% en la producción de biodiesel a partir de aceite de palma y un 2% a partir de levaduras, como se puede observar en la Figura 33.

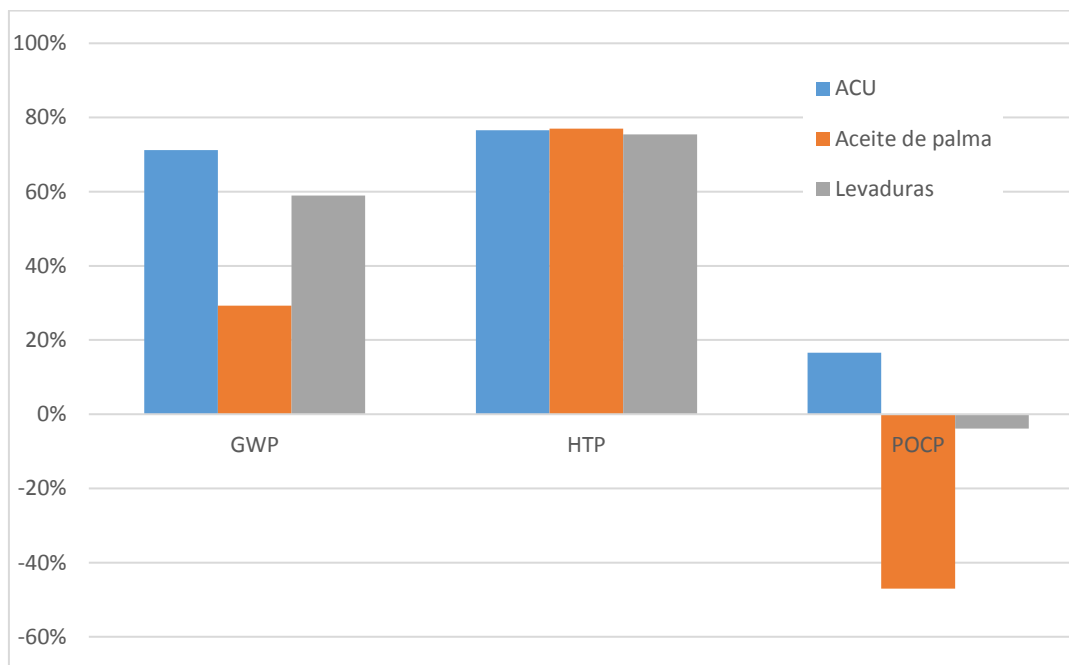


Figura 33 Comparación de mitigación de las rutas tecnológicas

En la COP-21 celebrada en París, México se comprometió a reducir el 22% de las emisiones con respecto a una línea base (211 millones de toneladas de dióxido de carbono). considerando la sustitución de una parte del diésel, de acuerdo a las proyecciones obtenidas y con respecto al potencial de mitigación de cada ruta tecnológica, se pueden evitar 0.36 millones de toneladas de dióxido de carbono, esto equivale al 0.16% de la línea base acordada durante la COP-21 y se alcanzaría una reducción del 1% de las emisiones en el sector de transporte.

A pesar de que el biodiésel a partir de aceite de palma, ACU y levaduras trae resultados positivos al comparar con el diésel fósil, con respecto a la categoría de GWP y HTP, existen otras categorías donde los resultados no son favorables, existe un incremento en siete categorías de impacto con respecto al diésel en el caso de biodiésel a partir de aceite de palma, en el caso de biodiésel a partir de ACU existe un incremento en cinco categorías de impacto, mientras que el biodiésel a partir de levaduras un incremento en seis categorías comparado con el diésel. En la Tabla 67 se observan los resultados.

Tabla 67 Potencial de mitigación de otras categorías de impacto

Categoría de impacto ambiental	ACU	Aceite de palma	Levaduras
Agotamiento abiótico	-51%	-13271%	-26%
Agotamiento abiótico (energía fósil)	70%	63%	63%
Calentamiento global	71%	29%	59%
Reducción de la capa de ozono	85%	66%	81%
Toxicidad humana	77%	77%	76%
Potencial de ecotoxicidad de agua fresca	-299%	-16051%	-77%
Potencial de ecotoxicidad de agua marina	-89%	-40%	-85%
Ecotoxicidad terrestre	6%	-18333%	58%
Formación de oxidantes fotoquímicos	17%	-47%	-2%
Acidificación	-107%	-181%	-117%
Eutrofización	-211%	-439%	96%

De acuerdo con la Tabla 68 el grueso de los impactos ocurre en la producción de insumos de la etapa industrial, en el caso de aceite de palma y ACU la electricidad y el metanol son los principales causantes. De igual manera se observa que la producción y uso de fertilizantes contribuye a las emisiones generadas en ocho categorías de impacto. Se observan las actividades principales de cada ruta tecnológica, las que más afectan a cada categoría de impacto.

Tabla 68 Actividades con mayor impacto en cada ruta tecnológica estudiada

Etapa	Actividad	ADP	ADP (fósil)	GWP	ODP	HTP	FWAEP	MAEP	TEP	POCP	AP	EP
Agrícola	Producción y uso de fertilizante	1			1		1	1	1	1	1	1
Trans-porte	Producción de gasolina		2	2	2	2		2				

			1 2	1	1	1	1						
	Uso de diésel												
Industrial	Producción y uso de metanol	2 3	1 2	1 2	1 2	1 2	1 2	2 3	1 2	2 3	1 2		
	Producción y uso de energía eléctrica	2	1 2	1 2	1 2	1 2	1 2	2	1 2	2	1 2		
	Producción y uso de sulfato de amonio	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Gestión de residuos	Detergente							2					
	Aguas residuales lagunas facultativas				1						1		
	Tiraderos a cielo abierto				1						1		
Distribución y uso de biodiesel	Uso de biodiesel			2		1 2 3				2	1 2 3	1 2 3	1 2 3
	Producción de gasolina			2						2		2	2
1 Ruta tecnológica de primera generación, biodiesel a partir de aceite de palma 2 ruta tecnológica de segunda generación, biodiesel a partir de ACU 3 ruta tecnológica de tercera generación, biodiesel a partir de levaduras													

Con respecto al análisis beneficio/costo, se puede observar que el biodiesel a partir de ACU es mejor que el biodiesel a partir de palma, puesto que la relación beneficio/costo del ACU es de 1.28 mientras que el aceite de palma es de 1.16, a partir del biodiesel de ACU hay más ganancias. Sin embargo, el potencial de producción es mucho menor que el aceite de palma.

Cabe mencionar que uno de los principales problemas en la producción de biodiesel en México es la sobreoferta de glicerina cruda, por lo que la colocación de la glicerina cruda en el mercado ha sido una tarea difícil. Por lo que proponer la utilización de la glicerina para producir biodiesel a partir de levaduras resuelve uno de los problemas de la industria del biodiesel en México, sin embargo, a realizar el análisis beneficio/costo se obtuvo que el proyecto de inversión no es rentable. La relación beneficio/costo cambia positivamente cuando la producción de biodiesel a partir de levaduras se incluye a un sistema de biorrefinería, como un proceso adicional para tratar la glicerina obtenida durante la producción de biodiesel a partir de aceite de palma y ACU, incrementando en un 10% el CTP y 1.3% las ganancias. Cabe mencionar que el sulfato de amonio representa un 4.8% del incremento del CTP, por lo que es importante encontrar nuevas fuentes de nitrógeno con un mejor precio de adquisición en el mercado.

CONCLUSIONES

México tiene la capacidad técnica y económica (análisis beneficio/costo mayor de la unidad en cada ruta tecnológica estudiada) de producir biodiesel a corto plazo y mediano plazo, las materias primas disponibles son; aceite de palma, ACU y levaduras usando como sustrato glicerina cruda. En el caso de aceite de palma la producción de biodiesel es posible, siempre y cuando se satisfaga en primer lugar la demanda de aceite de palma destinado a la alimentación. En el caso del biodiesel a partir de levaduras, la viabilidad económica es posible únicamente en un sistema de biorrefinería, con un rendimiento de la biomasa con respecto al sustrato igual o mayor a 0.57 g biomasa/g sustrato.

Con respecto a la evaluación de los impactos ambientales potenciales en el ciclo de vida de cada ruta tecnológica, se concluye que el biodiesel a partir de aceite de palma, ACU y levaduras potencialmente mitigarían entre 29-71% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GWP) al comparar con el diésel fósil. El biodiesel a partir de ACU es mejor en prácticamente todos los indicadores evaluados, pero su potencial de producción es mucho menor que el biodiesel de palma. Todas las rutas tecnológicas mitigan el GWP y el HTP. Sin embargo, el biodiesel de palma y levaduras incrementa el POCP.

A pesar de que el biodiesel a partir de aceite de palma, ACU y levaduras trae resultados positivos al comparar con el diésel fósil, con respecto al GWP, existen otras categorías donde los resultados no son favorables. Con respecto al diésel, el biodiesel de ACU mitiga siete de once categorías de impacto evaluadas, mientras que el biodiesel de aceite de palma mitiga cuatro de once categorías, finalmente el biodiesel a partir de levaduras mitiga seis de once categorías. La producción de biodiesel a partir de palma y levaduras, resuelve una parte del problema de la situación ambiental que se enfrenta el país, puesto que mitiga el GWP, sin embargo, afecta otras áreas de interés.

En el caso de la ruta tecnológica de biodiesel a partir de aceite de palma, se encontró que las actividades que aumentan estos incrementos en las categorías de impacto evaluadas son principalmente: la producción y uso de electricidad y metanol, en la etapa industrial, así como la producción y uso de fertilizantes, en la etapa agronómica, de igual manera la gestión de residuos en lagunas facultativas y tiraderos a cielo abierto. Esta ruta tecnológica puede mejorarse: eliminando los tiraderos a cielo abierto de biomasa y uso de lagunas facultativas, por lo que es necesario un mejoramiento en el tratamiento de aguas residuales y disposición de residuos sólidos.

La ruta tecnológica de biodiesel a partir de levaduras, se encontró que la principal actividad implicada en el incremento de los impactos evaluados es la producción y uso de sulfato de amonio utilizado para la fermentación. El mejoramiento de la ruta tecnológica consiste en encontrar nuevas fuentes de nitrógeno que no afecten el medio ambiente, puesto que en casi todas las categorías de impacto ambiental la etapa industrial, en especial la fermentación, es el

principal causante de emisiones. Esta ruta es interesante de seguir investigando, puesto que resolvería uno de los problemas que se enfrenta el país a la hora de producir biodiesel, la sobreoferta de glicerina cruda impide que esta sea colocada de manera sencilla en el mercado.

REFERENCIAS

Ahlgren, S., Björklund, A., Ekman, A., Karlsson, H., Berlin, J., Börjesson, P., et al. (2015). Review of methodological choices in LCA of biorefinery systems-key issues and recommendations. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 9(5), 606-619.

André, A., Diamantopoulou, P., Philippoussis, A., Sarris, D., Komaitis, M., & Papanikolaou, S. (2010). Biotechnological conversions of bio-diesel derived waste glycerol into added-value compounds by higher fungi: Production of biomass, single cell oil and oxalic acid. *Industrial Crops and Products*, 31(2), 407-416.

Angelovič, M., Tkáč, Z., & Jablonický, J. (2014). Determination model for cetane number of biodiesel at different fatty acid composition: A review. *Scientific Papers Animal Science and Biotechnologies*, 47(1), 365-371.

Angerbauer, C., Siebenhofer, M., Mittelbach, M., & Guebitz, G. (2008). Conversion of sewage sludge into lipids by *lipomyces starkeyi* for biodiesel production. *Bioresource Technology*, 99(8), 3051-3056.

ANIAME. (2006). Principales características del mercado mexicano de aceites y grasas

ANIAME. (2015). Asociación nacional de industriales de aceites y mantecas comestibles, A. C., <http://aniame.com/mx/wp-content/uploads/Estadisticas-del-Sector.pdf>.

Balat, M., Balat, H., & Öz, C. (2008). Progress in bioethanol processing. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(5), 551-573.

Bare, J. C., Hofstetter, P., Pennington, D. W., & De Haes, Helias A Udo. (2000). Midpoints versus endpoints: The sacrifices and benefits. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 5(6), 319-326.

Bauer, S. K., Grotz, L. S., Connelly, E. B., & Colosi, L. M. (2016). Reevaluation of the global warming impacts of algae-derived biofuels to account for possible contributions of nitrous oxide. *Bioresource Technology*, 218, 196-201.

Berrios, M., Siles, J., Martin, M., & Martin, A. (2007). A kinetic study of the esterification of free fatty acids (FFA) in sunflower oil. *Fuel*, 86(15), 2383-2388.

Berrios, M., & Skelton, R. (2008). Comparison of purification methods for biodiesel. *Chemical Engineering Journal*, 144(3), 459-465.

Blonkconsultants. Direct land use change assessment tool. <http://www.Blonkconsultants.Nl/>,

Bozbas, K. (2008). Biodiesel as an alternative motor fuel: Production and policies in the european union. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(2), 542-552.

CAPUFE. http://www.capufe.gob.mx/site/normateca/normas/77_Bases_para_la_Administracion_del_Parque_de_Maquinaria_a_cargo_de_CAPUFE_dic_05/Anexo05.pdf.

Castro, V. A. (2015). *Bioeconomia región centro biorrefinerías e integración industrial- el mercado mundial de biocombustibles*CARBIO.

Chatzifragkou, A., Makri, A., Belka, A., Bellou, S., Mavrou, M., Mastoridou, M., et al. (2011). Biotechnological conversions of biodiesel derived waste glycerol by yeast and fungal species. *Energy*, 36(2), 1097-1108.

Cherubini, F., & Strømman, A. H. (2011). Life cycle assessment of bioenergy systems: State of the art and future challenges. *Bioresource Technology*, 102(2), 437-451.

COMEXPALMA. <http://www.comexpalma.org/2017/index.php/situacion-de-la-palma/situacion-nacional-2016> n.d. 2016,

CONAGUA-SEMARNAT. Paquete tecnológico para el cultivo de palma de aceite . *Convenio Sigh-Gdtt-Uach-08/07/rf/cc Estudio De Factibilidad Para La Creacion Del Distrito De Temporal Tecnificado Catazaja-Palenque, Chiapas*,

Cortez, L. A., Nigro, F. E., Nogueira, L. A., Nassar, A. M., Cantarella, H., Moraes, M. A., et al. (2015). Perspectives for sustainable aviation biofuels in brazil. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2015

CUE. (2012). "Evaluación del ciclo de vida de la cadena de producción de biocombustibles en colombia" capítulo II: *Estudio ACV impacto-ambiental*. No. No. ATN/JC-10826-CO y ATN/JF-10827-CO). Mandellín.:

De Kam, M. J., Morey, R. V., & Tiffany, D. G. (2009). Integrating biomass to produce heat and power at ethanol plants. *Applied Engineering in Agriculture*, 25(2), 227-244.

de Pontes Souza, D., Mendonça, F. M., Alves Nunes, K. R., & Valle, R. (2012). Environmental and socioeconomic analysis of producing biodiesel from used cooking oil in rio de janeiro. *Journal of Industrial Ecology*, 16(4), 655-664.

Deeba, F., Kumar, V., Gautam, K., Saxena, R., & Sharma, D. (2012). Bioprocessing of jatropha curcas seed oil and deoiled seed hulls for the production of biodiesel and biogas. *Biomass and Bioenergy*, 40, 13-18.

Delucchi, M. A. (2010). Impacts of biofuels on climate change, water use, and land use. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1195(1), 28-45.

Demirbas, A. (2009). Biodiesel from waste cooking oil via base-catalytic and supercritical methanol transesterification. *Energy Conversion and Management*, 50(4), 923-927.

Dias, J. M., Alvim-Ferraz, M. C., & Almeida, M. F. (2008). Comparison of the performance of different homogeneous alkali catalysts during transesterification of waste and virgin oils and evaluation of biodiesel quality. *Fuel*, 87(17), 3572-3578.

Dufey, A. (2006). *Biofuels production, trade and sustainable development: Emerging issues* Iied.

Eisentraut, A. (2010). Sustainable production of second-generation biofuels.

Emecek T, S. J. (2011). Methods of assessment of direct field emissions for LCIs of agricultural production systems. . *Agroscope Reckenholz-TiniNRn Research Station ART 2011.*,

Fullana, P. (2009). *Life cycle: Assessment applications: Results from COST action 530: A joint effort by COST action 530: Life-cycle inventories for environmentally-conscious manufacturing processes* AENOR-Asociacion Espanola de Normalizacion y Certificacion-Ediciones.

Garcia, C., Riegelhaupt, E., & Masera, O. (2013). Escenarios de bioenergía en México: Potencial de sustitución de combustibles fósiles y mitigación de GEI.

García, O. (2006). Lodos residuales: Estabilización y manejo. *Caos Conciencia*, 1(1), 51-58.

Glišić, S. B., & Skala, D. U. (2009). Design and optimization of purification procedure for biodiesel washing. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 15(3), 159-168.

GobMex. (2014). *Compromisos de mitigación y adaptación ante el cambio climático para el periodo 2020-2030*.

González, M. Y., & Romero, H. M. (2010). Evaluación de diferentes fuentes de potasio para reducir el doblamiento foliar en palma de aceite. *Revista Palmas*, 31(3), 17-25.

González-Canal, I., & González-Ubierna, J. A. (2014). Aceites usados de cocina. problemática ambiental, incidencias en redes de saneamiento y coste del tratamiento en depuradoras. <https://www.Aguasresiduales.info/revista/articulos/problematICA-Ambiental->

[Incidencias-En-Redes-De-Saneamiento-y-Coste-Del-Tratamiento-En-Depuradoras-De-Los-Aceites-Usados-En-Cocina,](#)

Gutiérrez, L. F., Sánchez, Ó. J., & Cardona, C. A. (2009). Process integration possibilities for biodiesel production from palm oil using ethanol obtained from lignocellulosic residues of oil palm industry. *Bioresource Technology*, 100(3), 1227-1237.

Hansen, S. B., Olsen, S. I., & Ujang, Z. (2012). Greenhouse gas reductions through enhanced use of residues in the life cycle of Malaysian palm oil derived biodiesel. *Bioresource Technology*, 104, 358-366.

Hayakawa, K. (1967). A method for calculating the ratio of each possible type of triglyceride in natural fat. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 44(6), 354-356.

Hingu, S. M., Gogate, P. R., & Rathod, V. K. (2010). Synthesis of biodiesel from waste cooking oil using sonochemical reactors. *Ultrasonics Sonochemistry*, 17(5), 827-832.

Huang, C., Chen, X., Xiong, L., Ma, L., & Chen, Y. (2013). Single cell oil production from low-cost substrates: The possibility and potential of its industrialization. *Biotechnology Advances*, 31(2), 129-139.

Husain, Z., Zainac, Z., & Abdullah, Z. (2002). Briquetting of palm fibre and shell from the processing of palm nuts to palm oil. *Biomass and Bioenergy*, 22(6), 505-509.

Idris, S. S., Rahman, N. A., Ismail, K., Alias, A. B., Rashid, Z. A., & Aris, M. J. (2010). Investigation on thermochemical behaviour of low rank Malaysian coal, oil palm biomass and their blends during pyrolysis via thermogravimetric analysis (TGA). *Bioresource Technology*, 101(12), 4584-4592.

IEA. (2014). Bioenergy task 42: Biorefining. sustainable and synergetic processing of biomass into marketable food & feed ingredients, products (chemicals, materials) and energy (fuels, power, heat) .

IEA. (2017). CO2 emissions from fuel combustion., <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CO2EmissionsfromFuelCombustionHighlights2017.pdf>.

IEA. (2017). Key world energy statistics., <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2017.pdf>.

Igwe, J., & Onyegbado, C. (2007). A review of palm oil mill effluent (POME) water treatment. *Global Journal of Environmental Research*, 1(2), 54-62.

IHOBE. (2009). *ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA Y HUELLA DE CARBONO; dos maneras de medir el impacto ambiental de un producto*IHOBE; Sociedad Pública de Gestión Ambiental.

INECC. (2018). Inventario nacional de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero., <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero>.

INEGI. (2010). Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2010.

Inifap-Sagarpa. (2011). Programa estratégico para el desarrollo rural sustentable de la región sur- sureste de México: Trópico húmedo 2011.

IPCC. (2006). Biological treatment of solid waste., CHAPTER 4.

IPCC. (2006). Wastewater treatment and discharge., CHAPTER 6.

Iriarte, A., Rieradevall, J., & Gabarrell, X. (2012). Transition towards a more environmentally sustainable biodiesel in south america: The case of chile. *Applied Energy*, 91(1), 263-273.

Joshi, R. M., & Pegg, M. J. (2007). Flow properties of biodiesel fuel blends at low temperatures. *Fuel*, 86(1-2), 143-151.

Juszczak, P., Tomaszewska, L., Kita, A., & Rymowicz, W. (2013). Biomass production by novel strains of *yarrowia lipolytica* using raw glycerol, derived from biodiesel production. *Bioresource Technology*, 137, 124-131.

Kamm, B., Gruber, P. R., & Kamm, M. (2006). Biorefineries-industrial processes and products. *Biorefineries Industrial Processes and Products*. Wiley-VCH, Weinheim,

Kargi, F., & Shuler, M. L. (2008). How cells grow. *BIOPROCESS ENGINEERING basic concepts* (second edition ed., pp. 155-214) Prentice Hall PTR.

Khanna, M., & Chen, X. (2013). Economic, energy security, and greenhouse gas effects of biofuels: Implications for policy. *American Journal of Agricultural Economics*, , aat037.

Kim, S., & Dale, B. E. (2002). Allocation procedure in ethanol production system from corn grain I. system expansion. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 7(4), 237-243.

Koh, M. Y., & Ghazi, T. I. M. (2011). A review of biodiesel production from *jatropha curcas* L. oil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2240-2251.

Koutinas, A. A., Chatzifragkou, A., Kopsahelis, N., Papanikolaou, S., & Kookos, I. K. (2014). Design and techno-economic evaluation of microbial oil production as a renewable resource for biodiesel and oleochemical production. *Fuel*, 116, 566-577.

Kumaran, P., Mazlini, N., Hussein, I., Nazrain, M., & Khairul, M. (2011). Technical feasibility studies for langkawi WCO (waste cooking oil) derived-biodiesel. *Energy*, 36(3), 1386-1393.

Lapuerta, M., Herreros, J. M., Lyons, L. L., García-Contreras, R., & Briceño, Y. (2008). Effect of the alcohol type used in the production of waste cooking oil biodiesel on diesel performance and emissions. *Fuel*, 87(15), 3161-3169.

Leung, D., & Guo, Y. (2006). Transesterification of neat and used frying oil: Optimization for biodiesel production. *Fuel Processing Technology*, 87(10), 883-890.

Marchetti, J. M. (2010). *Biodiesel production technologies* Nova Science Publishers, Incorporated.

Márquez Farfán, L. M. (2014). Diseño de un sistema para la gestión de aceites vegetales usados en cañete para producir biodiesel.

Marticorena, A. A., Mandagarán, B. A., & Campanella, E. A. (2010). Análisis del impacto ambiental de la recuperación de metanol en la producción de biodiesel usando el algoritmo de reducción de desechos WAR. *Información Tecnológica*, 21(1), 23-30.

Mekhilef, S., Siga, S., & Saidur, R. (2011). A review on palm oil biodiesel as a source of renewable fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 1937-1949.

Meng, X., Yang, J., Xu, X., Zhang, L., Nie, Q., & Xian, M. (2009). Biodiesel production from oleaginous microorganisms. *Renewable Energy*, 34(1), 1-5.

Mohammadshirazi, A., Akram, A., Rafiee, S., & Kalhor, E. B. (2014). Energy and cost analyses of biodiesel production from waste cooking oil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 44-49.

Morais, S., Martins, A., & Mata, T. M. (2010). Comparison of allocation approaches in soybean biodiesel life cycle assessment. *Journal of the Energy Institute*, 83(1), 48-55.

Naik, S. N., Goud, V. V., Rout, P. K., & Dalai, A. K. (2010). Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 578-597.

Nazrain, M., Kumaran, P., Saifuddin, N., & Hussein, I. (2004). The study of energy potential from waste cooking oil in malaysia. Paper presented at the *Proceedings of National Seminar on Advances in Malaysia Energy Research (AMER)*,

Nemecek, T., & Schnetzer, J. (2011). Methods of assessment of direct field emissions for LCIs of agricultural production systems. *Agroscope Reckenholz-Tänikon Research Station ART*,

Norfaradila, J., Norela, S., Salmijah, S., & Ismail, B. (2014). Life cycle assessment (LCA) for the production of palm biodiesel in malaysia and thailand. *Malaysian Applied Biology*, 43(1), 53-63.

Pachauri, N., & He, B. (2006). Value-added utilization of crude glycerol from biodiesel production: A survey of current research activities. Paper presented at the *Proceedings of the ASABE Annual International Meeting*, , 9. pp. 1-16.

Papanikolaou, S., & Aggelis, G. (2010). *Yarrowia lipolytica*: A model microorganism used for the production of tailor-made lipids. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 112(6), 639-654.

Patil, P. D., & Deng, S. (2009). Optimization of biodiesel production from edible and non-edible vegetable oils. *Fuel*, 88(7), 1302-1306.

PEMEX. , DICOMEX.

Peters, M. S., Timmerhaus, K. D., West, R. E., Timmerhaus, K., & West, R. (2003). *Plant design and economics for chemical engineers* (quinta edicion ed.) McGraw-Hill New York.

Phan, A. N., & Phan, T. M. (2008). Biodiesel production from waste cooking oils. *Fuel*, 87(17-18), 3490-3496.

Pleanjai, S., Gheewala, S. H., & Garivait, S. (2007). Environmental evaluation of biodiesel production from palm oil in a life cycle perspective. *Asian Journal of Energy and Environment*, 8(1-2), 15-32.

Profeco. (2010). Estudio de calidad: Aceites vegetales comestibles. revista del consumidor.

Ramos, T. R. P., Gomes, M. I., & Barbosa-Póvoa, A. P. (2012). Minimizing CO2 emissions in a recyclable waste collection system with multiple depots. Paper presented at the *EUROMA/POMS Joint Conference*, pp. 1-5.

REN21. (2016). *Renewables 2016 global status report*. RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21ST CENTURY.

RSB. (2016). Indicadores de cumplimiento de los principios y criterios de la RSB 2011;2016.

Rupani, P. F., Singh, R. P., Ibrahim, M. H., & Esa, N. (2010). Review of current palm oil mill effluent (POME) treatment methods: Vermicomposting as a sustainable practice. *World Applied Sciences Journal*, 11(1), 70-81.

SAGARPA. (2010). MONOGRAFÍA DE CULTIVOS palma de aceite., <http://www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/Documents/pablo/Documentos/Monografias/Palma.pdf>.

SAGARPA. (2012). *Programa de producción sustentable de insumos para bioenergéticos y de desarrollo científico y tecnológico*

SAGARPA. (2013). *Futuro de la producción de biocombustibles en México.*

SAGARPA-INIFAP. (2011). Programa estratégico para el desarrollo rural sustentable de la región sur - sureste de México: Trópico húmedo 2011 .

Sagarpa-Inifap. (2012). Potencial productivo de especies agrícolas de importancia socioeconómica en México. .

Seider, W. D., Seader, J. D., & Lewin, D. R. (2009). *PRODUCT & PROCESS DESIGN PRINCIPLES: SYNTHESIS, ANALYSIS AND EVALUATION, (with CD)* John Wiley & Sons.

SEMARNAT. (2015). *México rumbo a la COP-21.SEMARNAT*

SENER. (2006). *Potenciales y viabilidad del uso del bioetanol y biodiesel para el transporte en México. (no. ME-T1007-ATN/DO-9375-ME y PN 04.2148.7-001.00).*

SENER. (2016). *Prospectiva de petrolíferos 2012 - 2030*

Sepúlveda González, I. (2012). Bioturbosina: Producción de cultivos energéticos para la aviación comercial. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas*, 3(3), 579-594.

Sheehan, J., Camobreco, V., Duffield, J., Shapouri, H., Graboski, M., & Tyson, K. (2000). *An Overview of Biodiesel and Petroleum Diesel Life Cycles,*

Sheinbaum-Pardo, C., Calderón-Irazoque, A., & Ramírez-Suárez, M. (2013). Potential of biodiesel from waste cooking oil in Mexico. *Biomass and Bioenergy*, 56, 230-238.

Shonnard, D. R., Klemetsrud, B., Sacramento-Rivero, J., Navarro-Pineda, F., Hilbert, J., Handler, R., et al. (2015). A review of environmental life cycle assessments of liquid transportation biofuels in the pan american region. *Environmental Management*, 56(6), 1356-1376.

Shuler, M., & Kargi, F. (2002). How cells grow. *Bioprocess Engineering Basic Concepts*, 2

SIAP. http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/ientidad/index.jsp.

SIAP. http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/ientidad/index.jsp n.d.

Silalertruksa, T., Bonnet, S., & Gheewala, S. H. (2012). Life cycle costing and externalities of palm oil biodiesel in thailand. *Journal of Cleaner Production*, 28, 225-232.

Sitepu, I. R., Garay, L. A., Sestric, R., Levin, D., Block, D. E., German, J. B., et al. (2014). Oleaginous yeasts for biodiesel: Current and future trends in biology and production. *Biotechnology Advances*, 32(7), 1336-1360.

Speight, J. G., & Radovanovic, L. (2015). Biofuels: Future benefits and risks. *Acta Technica Corviniensis-Bulletin of Engineering*, 8(3), 97.

Stichnothe, H., & Schuchardt, F. (2010). Comparison of different treatment options for palm oil production waste on a life cycle basis. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(9), 907-915.

Stichnothe, H., & Schuchardt, F. (2011). Life cycle assessment of two palm oil production systems. *Biomass and Bioenergy*, 35(9), 3976-3984.

Stöcker, M. (2008). Biofuels and biomass-to-liquid fuels in the biorefinery: Catalytic conversion of lignocellulosic biomass using porous materials. *Angewandte Chemie International Edition*, 47(48), 9200-9211.

Tiwari, A. K., Kumar, A., & Raheman, H. (2007). Biodiesel production from jatropha oil (*jatropha curcas*) with high free fatty acids: An optimized process. *Biomass and Bioenergy*, 31(8), 569-575.

Van Gerpen, J. (2005). Biodiesel processing and production. *Fuel Processing Technology*, 86(10), 1097-1107.

VAN NESS, S. J. (2007). *Introduccion a La Termodinamica En Ingenieria quimica/jm Smith, Hc Van Ness y mm Abbott.*,

Wang, Y., Ou, S., Liu, P., & Zhang, Z. (2007). Preparation of biodiesel from waste cooking oil via two-step catalyzed process. *Energy Conversion and Management*, 48(1), 184-188.

WSDA. Fertilizer product information: Diammonium phosphate 21-53-0 2015;2016.

WSDA. (2016). Commercial fertilizer 2016.

Wu, T. Y., Mohammad, A. W., Jahim, J. M., & Anuar, N. (2010). Pollution control technologies for the treatment of palm oil mill effluent (POME) through end-of-pipe processes. *Journal of Environmental Management*, 91(7), 1467-1490.

Yusoff, S. (2006). Renewable energy from palm oil—innovation on effective utilization of waste. *Journal of Cleaner Production*, 14(1), 87-93.

Zhang, C., Rangaiah, G. P., & Kariwala, V. (2012). Design and plantwide control of a biodiesel plant. *Plantwide Control: Recent Developments and Applications*, , 293-317.

Zhang, Y., Dube, M., McLean, D., & Kates, M. (2003). Biodiesel production from waste cooking oil: 1. process design and technological assessment. *Bioresource Technology*, 89(1), 1-16.

Zhu, L., Zong, M., & Wu, H. (2008). Efficient lipid production with trichosporonfermentans and its use for biodiesel preparation. *Bioresource Technology*, 99(16), 7881-7885.

ANEXOS

Anexo I. Directorio de empresas

En la Tabla 69 se observa el directorio de empresas encontradas en el país, que distribuyen, venden y recolectan ACU para obtener biodiesel.

Tabla 69 Directorio de empresas en el país de biodiesel

Estado	Nombre de la empresa	Datos de contacto	URL
Aguascalientes	Reco Reuse Company	Sergio Sosa Lara "Carretera Panamericana KM 542 Bodega ""D"", VIÑEDOS RIVIER tel: 01 449 973 4842 20355 Jesús María, Aguascalientes"	http://www.reco.green/
Aguascalientes	Biocombumex	01 449 225 7804 https://www.facebook.com/Biocombumex- biodiesel-829872957127856/ Pabellón de Arteaga, Aguascalientes	bioyaceites@gmail.com
Baja California	Bior	Fray Mayorga 17026, Col. Garita de Otay, Tijuana, Baja California Sur 22430	www.bior.mx
Baja California	Enremex	Tijuana Lic. Alejandro Sifuentes CEL: 6645031300 (Privado)+D10	alejandro@enremex.com
Chiapas	BIONERMEX Grupo Propalma (Empresa Promotora de Palma del Soconusco SAPI de C.V.)	Tel oficinas: Tapachula: 01 962 62 81302 - 01 962 62 84043 Tel. planta Acatahua: 01 918 64 70619 Ubicación: en el ejido Barrio Nuevo municipio de Acapetahua Chiapas, en la región denominada Soconusco.	
Chihuahua	Purolite de México	CD Juarez http://purolite.com/RelId/616956/ISvars/default/Home.htm Teléfono: 01 55 4168 8857	http://purolite.com/RelId/616956/ISvars/default/Home.htm
DF	Purolite de México	Marsella 12-B No. 201, Valle Dorado, 54020 Tlalnepantla de Baz, MEX http://purolite.com/RelId/616956/ISvars/default/Home.htm Teléfono: 01 55 4168 8857	http://purolite.com/RelId/616956/ISvars/default/Home.htm
DF	Reoil de Mexico	(55) 55 87 00 33. info@reoil.net jose.pena@reoil.net jjd@reoil.net web: www.reoil.net	www.reoil.net

DF Biofuels de Distrito Federal y Zona Metropolitana (0155) 17 42 15 18 <http://recoleccionaceite.com/>
mexico sa de <http://www.recoleccionaceite.com/contacto/50-contacto/2-cv> contacto-general.html

Combustibles info@combustiblesriman.mx Denayuca 64 Parque industrial
Riman, S.A. deSan Nicolas Tlalnepantla Estado de México 54030 Tel: (55)

Estado de México C.V. 63926000 info@combustiblesriman.mx
BIORECEN,

Estado de México S.A. DE C.V. Elías Rodríguez Ecatepec de Morelos, Estado de México
Biofuels de0174 42165229 acapulco
mexico sa de<http://www.recoleccionaceite.com/contacto/50-contacto/2-cv>

Guerrero contacto-general.html <http://recoleccionaceite.com/>

guajuato GREASENOL Marco Muñoz; greasenol@gmail.com greasenol@gmail.com
Combustibles
Ecológicos deFrancisco I Madero 654, Col. Santa Anita, Tlaquepaque,
Occidente Jalisco, México. C.P. 45600 tel: 52 1 (33) 1758 3559, 1816atapia@ceofuel.mx;

Guadalajara SAPI DE C.V. 4478 atapia@ceofuel.mx; info@ceofuel.mx info@ceofuel.mx
Empresa
Mexicana Oli.
Dedicda a la
recolección y
reciclaje de Av. Union #458-b Col. Obrera Centro C.P. 44140
aceite vegetal Guadalajara, Jalisco. Tel: (01 33) 36 30 00 71 Fax: (01 33)

Guadalajara usado (AVU) 36 30 26 14 info@oli.mx
Grupo Abasolo, Las Moras 3, San Juan de los Lagos, Jal.
campestre y 3951190764 /01 395 785 3687 CONTACTO: Silvano
empresa Gallardo Ramirez

Guadalajara PROAN

Guadalajara Green fuel Carlo Muñoz green.fuel.mx@gmail.com www.greenfuel.com.mx
Volcán Jorullo 5155, El Colli Urbano, Zapopan, Jalisco.
45070 <http://www.fuelflexmexico.com.mx/contacto.html> Tel:

Guadalajara Fuel Flex 1542 7555 ventas@fuelflexmexico.com.m
México x

Diego Moreno Casado diego_morenocasado@hotmail.com
tel: (33) 18 16 44 78 Francisco I Madero #645, Col. Santa
Anita Jalisco.C.P. 45600

CED FUEL

Guadalajara Live Green www.ceofuel.mx

Guadalajara	Biofuels de mexico sa de cv BIOENERMEX Refineria de aceites vegetales.	(0133)16175441 Guadalajara http://www.recoleccionaceite.com/contacto/50-contacto/2- contacto-general.html	http://recoleccionaceite.com/
Michoacan	Oleo Sur S.A. de C.V. Biodiesel	Parque de la Pequeña y Mediana Industria Tel: 01(443) 3229000 Ext. 5556. rulazos@hotmail.com	rulazos@hotmail.com http://www.moreco.com.mx/bio
Michoacan	Moreco	http://www.moreco.com.mx/contacto/	http://www.moreco.com.mx/bio diesel/
Monterrey	GREASENOL Ecoen; soluciones sustentables	Marco Muñoz; greasenol@gmail.com	greasenol@gmail.com
Monterrey	Enerviva Biocombustible	Parque de la Innovación y tranferencia de tecnología (Tecnologiaci de Monterrey Campus S.L.P) Carretera San Luis-Guadalajara # 1510 Piso 2 Oficina 13 San Luis Potosí, S.L.P 78211. TEL: (444) 274 01 09	http://www.ecoen.mx/contacto.html http://www.ecoen.mx/ contacto@enerviva.mx
Monterrey	s Internacionales , S.A. de C.V.	Ing. Cesar Cadena (Director) Elena Silva (Gerente de Compras) Libramiento Alfonso Martínez Km 4 S/N Local 2 Cadereyta, Nuevo León 67480 info@grupoenergeticos.com Daniel Gómez Iñiguez, info@solben.org.mx www.solben.org.mx/ tel: (52 81) 81907765 Monterrey, N.L	http://grupoenergeticos.com/bi ocombustibles.html
Monterrey	SOLBEN	Mexico.	www.solben.org.mx
Oaxaca Monte del Toro, Ejutla de Crespo, Oaxaca	Agencia Monte de Toro	comu_social@oax.sagarpa.gob. Mx (951) 514 9043, Ext. 42204 contacto: Gustavo Mauricio Monjaras Cabañas	www.sagarpa.gob.mx/Delegaci ones/oaxaca/boletines/2015/jul io/Documents/2015B163.pdf"
Puebla	Biodiesel Grima	16 poniente 1919 col.Jesus García C.P. 72090. Puebla (+521) 22 23 71 35 12 y 01(222) 232 73 48 Ing. Michel Ramirez Ibañez tel: 01 222 24 74 980, 222 17	http://www.grimabiodiesel.com /index.html#inicio
Puebla	Probioram, S. de R.L. de M.I	46 235, Carretera a Huixcolotla Km 4 S/N Acatzingo, Puebla	probioramsderlmi@yahoo.com https://prezi.com/o8kj2nxplgqc/copy-of-integrated- .mx

marketing-strategy/

	Import		
Queretaro	Biodiesel, S.A. de C.V.	Tel: 442 218 0978 Ciruelos 137-21 Col. Juridica. C:P. 76100, Santiago de Queretaro, México. recoleccion@biodiqro.com	
		https://www.facebook.com/biodiqro/ número de contacto: 01	
Queretaro	Biodiqro	442 217 5344 Av. Xel-há, lote 1, local No. 4, SM 28, Manzana 7, Cancún Quintana Roo (998)8879150, (998)8878550 Y	recoleccion@biodiqro.com
Quinta Roo	ASGHAM S.A. DE C.V.	proyectosambientales@controlbiologico.com.mx CALLE 40 NORTE, # 1, LOTE 10, MANZANA 88, COLONIA	recoleccion@biodiqro.com
	RECICLADOR A ALIMAK, S.A. DE C.V.	EL PEDREGAL, PLAYA DEL CARMEN , Q. ROO. 9841082390 Y abril@mayaverde.com	
Quinta Roo		CALLE GUADALUPE VICTORIA, MAZANA 44, LOTE 07,	http://recoleccionaceite.com/
	CIRIA RODRIGUEZ	REGION 224, FRACCIONAMIENTO LOS HEROES, CANCUN, Q. ROO 9982080561 Y	
Quinta Roo	PRIETO	ciriario44@gmail.com	
	GEECO SERVICIOS INDUSTRIALE S, S.A. DE C.V.	Av. Chichen Itza 102 Smza 27 Mza 10 Lte 2, Cancún, Quintana Roo. (998)2537987 Y info@grupoecoserv.com	
Quinta Roo		Region 235, Mza 49, Lte 14 Calle 116 C.P. 77510 Cel.9981664091	
	MIGUEL GALLEGOS CONTRERAS	Tel.(998)2671765 Y servican_mantenimient o@hotmail.com	
	EZEQUIEL CORDOVA	Sm 232, mza 32, lote 20, Av. Niños Heroes, Cancun, Quintana Roo. (998)1022077 Y	
Quinta Roo	BAEZA	ezequielsmadyccancun @hotmail.com	

	ECOGRASAS	
Quinta Roo	SERVICIOS DEL CARIBE	CALLE 26, No. 26, FRACCIONAMIENTO ARBOLEDAS, CANCUN, BENITO JUAREZ, Q. ROO
	GRAXA INGENIERIA EN MANTENIMIENTOS	SUPERMANZANA 74, MANZANA 40, CALLE ART 123, LOTE 206, COLONIA LOMBARDO T., CANCUN, BENITO JUAREZ, Q. ROO 9988103134 Y graxa.operaciones@gmail.com
Quinta Roo	SERVICIOS DE RECOLECCIÓN DE GRASAS Y ACEITES DEL GOLFO, S.A. DE C.V. ZAID	AV. LAS GAVIOTAS 08, MANZANA 11, LOTE 17, SUPERMANZANA 202, CANCUN, BENITO JUAREZ, Q.ROO jose.manuel.quinones.q uiara@hotmail.com
Quinta Roo	BALTAZAR CORREA CASTRO	CALLE CARLOS LUIS ECHEVERRIA, SUPERMANZANA 307, MANZANA 145, LOTE 01, LOCALIDAD ALFREDO V. BONFIL, BENITO JUÁREZ, Q. ROO
		Calle Oaxactun, Mza 4, Smza 97, Seccion 1, Zona Industrial, Cancún, Quintana Roo. 9988435063 Y 9999835190 Y
	RAIZ VERDE MEXICO S.A. DE C.V.	info@ecoiniciativa.com Y fernando@ecoiniciativa
Quinta Roo	Ugasa soluciones ambientales	Av. Acanceh SM 11 Plaza Terraviva Piso 3, 77504 Cancún, Quintana Roo info@ugasa.mx
	Grasas Peninsulares S.A. de C.V.	SUPERMANZANA 506, MANZANA 01, LOTE 10, DEPARTAMENTO A, FRACCIONAMIENTO EL PEDREGAL, CANCUN QUINTANA ROO Tel (998)2792006 Y grasaspeninsulaescancun@gmail.com
Quinta Roo	ECOLSUR S.A. DE C.V.	LOTE 22, KM 304.8, CARRETERA VALLADOLIDPUERTO JUÁREZ, BENITO JUÁREZ, QUINTANA ROO (01)9982093283, 2093222 Y 8987285 Y martin.arellano@biosistem.mx
Quinta Roo	INGREDIENTE S Y	Calle feliciano flores mza. 439, Lt. 1-11, alfredo v. bonfil, Benito Juárez, Quintana Roo. 9988822746 y cel.

	MATERIAS	9981477156 Y sonnecancun@prodigy.		
	PRIMAS DEL		com	
	NORTE S.A.			
	DE C.V.			
	GRUPO	Av. Francisco I. Madero (ruta 4) Sm 70, Mza 5 Lote 1, altos		
	SACHASA	1. Cancún Quintana Roo. 9988917658 Y		
Quinta Roo	S.A. DE C.V.		gerencia@marfusa.com	
	Biocom /			
	Grupo			
Quintana Roo	LODEMO		Cancún	
	Eco Iniciativa			
Quintana Roo	Q.roo			
	Biofuels	de(52	55)	2000 2627
	mexico sa	de	http://www.recoleccionaceite.com/contacto/50-contacto/2-	
Quintana Roo	cv	contacto-general.html		http://recoleccionaceite.com/
San Luis potosi	GREASENOL	Marco Muñoz; greasenol@gmail.com		greasenol@gmail.com
	Combustibles			
	Biologicos	de		
	México SA	de		
	CV	contacto@combiomex.com	Tel: 9931609430	Otilia Valencia
	"COMBIOMEX	Nuñez S/N Villahermosa	86280	
Tabasco	"			contacto@combiomex.com
	Biofuels	de(0122)82059843		Xalapa
	mexico sa	de	http://www.recoleccionaceite.com/contacto/50-contacto/2-	
Veracruz	cv	contacto-general.html		http://recoleccionaceite.com/
	Contacto:	Gabriel		Aguilar,
		gabriel.aguilar@lodemored.com.mx;	Tel: (999) 919 55 11	
	Biocom / Grupo	942 21 00 Anillo Periférico Manuel Berzunza Tab. Cat. 13950		http://biocommexico.mx/agroindustria/
Yucatán	LODEMO	Col. Francisco de Montejo C.P 97200, Yucatán		http://www.renov.com.mx/
		Tel: Oficina +52 (999) 371 8733		Celular 9999 00 39 07
	RENOV	contacto@biodieselmexico.mx		
Yucatán	Biodiesel	Mérida, Yucatán, México.		http://www.renov.com.mx/
		Tel: (999) 1229248 y (999) 9492476		calle 56 N0. 471
	Energías Girón	Ampliación	Cd	industrial, CP:97288.
Yucatán	SA	contacto@energiagiron.com	Mérida, Yucatán	www.energiagiron.com

Anexo II. Productividad del aceite de palma

En la Tabla 70 se observan los datos utilizados para obtener la productividad de toneladas por hectáreas en un año de los racimos de fruta fresca. A saber 15.01 t/ha en Chiapas, 7.41 t/ha en Campeche y 8.33 Veracruz.

Tabla 70 Producción por hectárea de racimos de fruta fresca

Año	Chiapas		Campeche		Veracruz	
	Superficie de hectáreas cosechadas	Productividad t/ha	Superficie de hectáreas cosechadas	Productividad t/ha	Superficie de hectáreas cosechadas	Productividad t/ha
2007	15449	14.77	1600	6.62	4523	9.35
2008	16197	14.98	1670	4.75	4394	8.96
2009	16211	16.14	1794	4.67	6418	9.28
2010	19902	17.19	1395	4.49	6427	7.75
2011	20887	19.16	1321	11.84	6357	6.56
2012	19981	16.3	3145	7.24	6981	6.88
2013	29738	12.86	3690	8.11	6986	8.85
2014	32364	14.05	3680	7.57	7002	8.75
2015	34215	12.83	3857	9.02	7002	9.07

Fuente: (SIAP)

Cabe mencionar que en el caso de Tabasco la productividad se obtuvo a partir de datos de primera mano (9.73 t/ha), como se observa en la Tabla 71.

Tabla 71 Productividad t/ha en algunas localidades de Tabasco

Localidad	Numero de ha	Productividad t/ha
Teapa	4,5	1
Teapa	6	24
Teapa	7	5
Teapa	8	22
Teapa	10	2
Teapa	4	10
Jalapa	2	8
Teapa	4	1,5
Teapa	8	18
Teapa	4	6
Teapa	11	22
Teapa	7	6
Teapa	10	15

Teapa	10	8
Teapa	25	9
Teapa	25	9
Teapa	2	8
Jalapa	1	8
Jalapa	3	8
Jalapa	1	5
Jalapa	2	8
Jalapa	16,5	7
Jalapa	20	8
Jalapa	7	7
Teapa	4	4
Teapa	20	4
Teapa	16	21
Teapa	10	6
Teapa	20	5
Teapa	600	12
Teapa	4	6
Teapa	3,25	7
Teapa	7	5
Teapa	5	17
Teapa	7	6
Jalapa	2	4
Jalapa	3	5
Jalapa	4,5	6
Jalapa	2,5	6
Jalapa	50	9
Jalapa	4	8
Jalapa	4,5	6
Jalapa	3	9
Jalapa	9	6
Jalapa	4	7
Jalapa	20	8
Jalapa	10	6
Jalapa	2	6
Jalapa	90	11
Jalapa	130	12
Jalapa	10	9
Jalapa	10	9
Jalapa	15	9
Teapa	4	16
Teapa	3	2
Jalapa	1	10

Anexo III. Insumos de la etapa agrícola

Etapa agrícola considerando el paquete tecnológico realizado por la Sagarpa y el INIFAP durante el primer año, como se observa en la Tabla 72.

Tabla 72 Paquete tecnológico para palma de aceite (Sagarpa-Inifap)

Concepto	Unidad	Cantidad
Fertilización		
Ffórmula 17-17-17	Kg/ha	150
Control de plagas y enfermedades		
Rodenticida	l/ha	2
Insecticida (parathion M)	Kg/ha	2

(SAGARPA-INIFAP, 2011)

Cabe mencionar que, a partir del tercer año, el uso de fertilizante es de 180 kg/ha y el uso de rodenticida el reporte especifica que única mente es para el primer año, estos datos se utilizaron para Campeche y Veracruz.

En el caso de Chiapas se consideró el paquete tecnológico proporcionado por la CONAGUA. Puesto que el reporte no hace distinción con respecto al establecimiento y la cosecha, se consideraron estos datos anuales por cada 25 años, como se observa en la Tabla 73.

Tabla 73 Paquete tecnológico para palma de aceite (CONAGUA)

Concepto	Unidad	Cantidad
fertilización		
Urea	kg/ha	300
Superfosfato de calcio triple	kg/ha	130
Control de malezas		
Gramoxone	l/ha	300
Karmex	kg/ha	5
Glifosato	l/ha	3
control de plagas		
captan	kg/ha	5
malathionzn	l/ha	1
agrimicin	l/ha	2
thiram	l/ha	2

(CONAGUA-SEMARNAT)

En el caso de Tabasco se utilizaron los datos obtenidos de plantaciones reales (comunicación personal), las cantidades establecidas es anual, como se observa en la Tabla 74.

Tabla 74 Datos de palma de aceite en la etapa agrícola (Tabasco)

	Año 1-3	Año 4-5	año 6 a 10	de 11 a 15 año	16 a 20 años	21 en adelante
Fertilizacion						
Urea kg/ha	79.64	14.46	100.63	4.52	5.98	
Triple fostafot kg/ha	6.11	68.34	124.05	41.94	222.26	63.75
NPK kg/ha	3.21	33.73		263.55	23.32	
Control malezas						
Paracuta kg/ha	0.130	0.55	1.09	1.04	0.719	1.25
Velfosato kg/ha		0.10	0.28	0.077	1.125	
Glifosato kg/ha	0.019	0.29		0	0.022	
Faena kg/ha		1.06		0.671	0.070	
Graminicida l/ha	0.941					
Cupoquat kg/ha				0.194	0.039	0.375
Cerillo kg/ha		0.096	0.32			
Gramuron kg/ha						
Control de plagas						
Foley l/ha	0.535	0.22		0.348	0.790	0.125
Siroco kg/ha	0.478	0.58			1.725	
Maiz envenenado kg/ha	1.66	0.58			1.725	
Venomil kg/ha		0.39				

Anexo IV. Balance de materia y energía, biodiesel a partir de aceite de palma

En la Tabla 75 se muestra el balance de materia y energía en el proceso de producción de biodiesel a partir de aceite de palma.

Tabla 75 Balance de materia y energía a partir de aceite de palma obtenido del simulador Aspen Plus

Total	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
Temperature C	25	140	140	40	40	40	90	25	79,5	79,5
Pressure atm	-23,216	-12521000	-12521000	-23,125	-5,45	-17,675	-17,437	-3,521	-6,311	-14,648
Mass Flow kg/day	37053,84	10000	2,4E+10	37053,84	8731,95	28321,89	28321,89	5620,526	10220,345	23722,071
WATER	10004,537	10000	2,4E+10	10004,537	209,567	9794,97	9794,97	5620,526	4254,677	11160,819
METHANOL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NAOH	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GLYCEROL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Biodiesel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ac. Grasos libres	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Trigliceridos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Digliceridos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Monogliceridos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H2SO4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K2SO4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
KOH	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FRUIT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Racimos de fruta vacia	2593,769	0	0	2593,769	0	2593,769	2593,769	0	2593,769	0
Aceite	7781,306	0	0	7781,306	0	7781,306	7781,306	0	778,131	7003,176

Torta residual	5558,076	0	0	5558,076	0	5558,076	5558,076	0	0	5558,076
Total	F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18	F19	F20
Temperature C	79,5	79,5	67,3	67,3	67,3	67,3	67,2	100	25	30
Enthalpy MMBtu/hr	-2,917	-11,731	-6,811	-6,74	-0,071	-1,332	-1,403	-0,726	-0,008	-0,207
Mass Flow kg/day	4724,365	18997,706	11578,766	10878,448	700,318	7418,94	8119,258	7058,98	70,59	705,9
WATER	0	11160,819	10044,737	10044,737	0	1116,082	1116,082	55,804	0	0
METHANOL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	705,9
NAOH	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GLYCEROL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Biodiesel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ac. Grasos libres	0	0	32,654	0	32,654	293,891	326,544	326,544	326,548	0
Trigliceridos	0	0	667,663	0	667,663	6008,967	6676,628	6676,628	0	0
Digliceridos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Monogliceridos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H2SO4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K2SO4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SOLIDOS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
KOH	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SEMILLA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cascara	0	7003,176	0	0	0	0	0	0	0	0
Aceite	4724,365	833,711	833,711	833,711	0	0	0	0	0	0

Total	F21	F22	F23	F24	F25	F26	F27	F28	F29	F30
Temperature C	29,4	55	40	40	25	50	50	50	25	25
Enthalpy MMBtu/hr	-0,984	-0,963	-0,789	-0,188	-0,015	-0,202	-0,195	-0,008	-0,51	-0,041
Mass Flow kg/day	7835,49	7835,49	7214,369	621,12	75,776	696,903	579,215	117,688	1731,449	144,287
WATER	55,804	57,308	3,532	53,776	0	78,11	78,11	0	0	0
METHANOL	705,9	703,224	202,839	500,385	0	500,385	500,385	0	1731,449	0
NAOH	0	0	0	0	0	0	0	0	0	144,287
GLYCEROL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Biodiesel	0	24,596	24,586	0,01	0	0,01	0,01	0	0	0
Ac. Grasos libres	0	326,548	303,123	302,412	0,711	0	0,711	0,711	0	0
Trigliceridos	6676,648	6676,648	6676,647	0	0	0	0	0	0	0
Digliceridos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Monogliceridos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H2SO4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K2SO4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
KOH	0	0	0	0	75,776	0	0	0	0	0

Total	F31	F32	F33	F34	F35	F36	F37	F38	F39	F40
Temperature C	27,2	55	55	60	60	120	170	120	170	30
Enthalpy MMBtu/hr	-0,55	-0,544	-1,307	-0,816	-0,487	-0,077	-0,205	-0,689	-0,228	-0,241
Mass Flow kg/day	1875,736	1875,736	9090,105	7390,68	1699,423	317,801	856,677	7072,879	842,747	842,747
WATER	0	0	3,532	0,4	3,132	0,379	3,043	0,021	0,089	0,089
METHANOL	1731,449	1731,449	1188,299	331,865	856,434	314,105	823,438	17,76	32,996	32,996
NAOH	144,287	144,287	144,287	16,337	127,95	0	0	16,337	127,951	127,951
GLYCEROL	0	0	706,28	2,166	704,114	0,32	25,162	1,846	678,952	678,952
Biodiesel	0	0	6656,021	6654,106	1,913	2,515	1,271	6651,591	0,641	0,641
Ac. Grasos libres	0	0	0	302,412	301,928	0,484	0,016	0,007	301,914	0,476
Trigliceridos	0	0	30,997	30,997	0	0	0	30,997	0	0
Digliceridos	0	0	8,747	8,747	0	0	0	8,747	0	0
Monogliceridos	0	0	45,18	43,641	1,537	0	0,007	43,641	1,531	1,531
H2SO4	0	0	0	0	0	NH3	0	0	0	0
K2SO4	0	0	0	0	0	H2SO4	0	70,59	0	70,59
KOH	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Total	F41	F42	F43	F44	F45	F46	F47	F48
Temperature C	120	120	30	155,9	42	140,2	146,9	30
Enthalpy								
MMBtu/hr	-0,004	-0,685	-0,739	-0,282	-0,788	-0,283	-0,283	-0,345
Mass Flow kg/day	24,996	7047,884	7047,884	1174,478	7214,369	1174,478	1174,478	1174,478
WATER	0	0,021	0,021	3,422	3,532	3,422	3,422	3,422
METHANOL	4,795	12,965	12,965	1137,543	202,839	1137,543	1137,543	1137,543
NAOH	0	16,337	16,337	0	0	0	0	0
GLYCEROL	1,163	0,683	0,683	25,483	0	25,483	25,483	25,483
Biodiesel	0	6651,591	6651,591	3,786	24,586	3,786	3,786	3,786
Ac. Grasos libres	0,476	0	301,914	301,914	0,023	302,412	0,023	0,023
Trigliceridos	6,198	24,799	24,799	0	6676,647	0	0	0
Digliceridos	3,673	5,072	5,072	0	0	0	0	0
Monogliceridos	9,165	34,476	34,476	0,007	0	0,007	0,007	0,007
H2SO4	0	0	0	0	0	0	0	0
K2SO4	70,59	4,351	66,239	0	0	0	0	0
KOH	0	0	0	0	0	0	0	0

Anexo V. Cinéticas de reacción

La cinética de reacción utilizada para la esterificación acida se encuentra en la Tabla 76.

Tabla 76 Parámetros de las cinéticas de reacción para la esterificación ácida de ACU

Reacción	k	n	E (kJ/kmol)
Metanol + Ac. Oleico → Metil-O + agua	2.869E+06	0	50,745.2
Metil-O + agua → Metanol + Ac. Oleico	0.037068	0	31,007.3
Metanol + Ac. Linoleico → Metil-Li + agua	2.869E+06	0	50,745.2
Metil-Li + agua → Metanol + Ac. Linoleico	0.037068	0	31,007.3
Metanol + Ac. Estearico → Metil-S + agua	2.869E+06	0	50,745.2
Metil-S + agua → Metanol + Ac. Estearico	0.037068	0	31,007.3

Datos experimentales obtenidos por Berrios et al., 2007

Mientras que en la Tabla 77 se observan los parámetros de las cinéticas utilizadas en el Simulador Aspen Plus para la reacción de transesterificación.

Tabla 77 Parámetros de las cinéticas de reacción para la transesterificación

Tipo de aceite	Reacción	k	n	E (kJ/kmol)
XXX	XXX + MeOH + 0NAOH → Methyl-X + XX-	0.023110755	0	56521.8
XXX	Methyl-X + XX- → XXX + MeOH	0.001866670	0	43124
XXX	XXX + MeOH + 0NAOH → Methyl-X + X-X	0.023110755	0	56521.8
XXX	Methyl-X + X-X → XXX + MeOH	0.001866670	0	43124
XXX	XX- + MeOH + 0NAOH → Methyl-X + X--	0.106592460	0	72850.32
XXX	Methyl-X + X-- → XX- + MeOH	0.002216667	0	67826.16
XXX	X-- + MeOH + 0NAOH → Methyl-X + Glycerol	0.057541062	0	25958.2
XXX	Methyl-X + Glycerol → X-- + MeOH	0.000266667	0	49822.92
XXX	XX- + MeOH + 0NAOH → Methyl-X + 2-X-	0.106592460	0	72850.32
XXX	Methyl-X + 2-X- → XX- + MeOH	0.002216667	0	67826.16
XXX	2-X- + MeOH + 0NAOH → Methyl-X + Glycerol	0.057541062	0	25958.2
XXX	Methyl-X + Glycerol → 2-X- + MeOH	0.000266667	0	49822.92
XXX	X-X + MeOH + 0NAOH → Methyl-X + X--	0.106592460	0	72850.32
XXX	Methyl-X + X-- → X-X + MeOH	0.002216667	0	67826.16
XYZ	XYZ + MeOH + 0NAOH → Methyl-X + ZY-	0.008	0	56521.8
XYZ	Methyl-X + ZY- → XYZ + MeOH	0.002	0	43124.04
XYZ	XYZ + MeOH + 0NAOH → Methyl-Y + X-Z	0.023110755 (LI) ó 0.0077 (O)	0	56521.8
XYZ	Methyl-Y + X-Z → XYZ + MeOH	0.002	0	43124.04

XYZ	XYZ + MeOH + 0NAOH → Methyl-Z + XY-	0.008	0	56521.8
XYZ	Methyl-Z + XY- → XYZ + MeOH	0.002	0	43124.04
XYZ	ZY- + MeOH + 0NAOH → Methyl-Y + Z--	0.053	0	72850.32
XYZ	Methyl-Y + Z-- → ZY- + MeOH	0.002	0	67826.16
XYZ	Z-- + MeOH + 0NAOH → Methyl-Z + Glycerol	0.058	0	25958.2
XYZ	Methyl-Z + Glycerol → Z-- + MeOH	0.000	0	49822.92
XYZ	ZY- + MeOH + 0NAOH → Methyl-Z + 2-Y-	0.053	0	72850.32
XYZ	Methyl-Z + 2-Y- → ZY- + MeOH	0.002	0	67826.16
XYZ	2-Y- + MeOH + 0NAOH → Methyl-Y + Glycerol	0.058	0	25958.2
XYZ	Methyl-Y + Glycerol → 2-Y- + MeOH	0.000	0	49822.92
XYZ	X-Z + MeOH + 0NAOH → Methyl-X + Z--	0.053	0	72850.32
XYZ	Methyl-X + Z-- → X-Z + MeOH	0.002	0	67826.16
XYZ	X-Z + MeOH + 0NAOH → Methyl-Z + X--	0.053	0	72850.32
XYZ	Methyl-Z + X-- → X-Z + MeOH	0.002	0	67826.16
XYZ	X-- + MeOH + 0NAOH → Methyl-X + Glycerol	0.058	0	25958.2
XYZ	Methyl-X + Glycerol → X-- + MeOH	0.000	0	49822.92
XYZ	XY- + MeOH + 0NAOH → Methyl-X + 2-Y-	0.053	0	72850.32
XYZ	Methyl-X + 2-Y- → XY- + MeOH	0.002	0	67826.16
XYZ	XY- + MeOH + 0NAOH → Methyl-Y + X--	0.053	0	72850.32
XYZ	Methyl-Y + X-- → XY- + MeOH	0.002	0	67826.16
YXX	YXX + MeOH + 0NAOH → Methyl-X + YX-	0.015	0	56521.8
YXX	Methyl-X + YX- → YXX + MeOH	0.002	0	43124.04
YXX	YXX + MeOH + 0NAOH → Methyl-X + X-Y	0.015	0	56521.8
YXX	Methyl-X + X-Y → YXX + MeOH	0.002	0	43124.04
YXX	YXX + MeOH + 0NAOH → Methyl-Y + XX-	0.008	0	56521.8
YXX	Methyl-Y + XX- → YXX + MeOH	0.002	0	43124.04
YXX	YX- + MeOH + 0NAOH → Methyl-X + Y--	0.053	0	72850.32
YXX	Methyl-X + Y-- → YX- + MeOH	0.002	0	67826.16
YXX	Y-- + MeOH + 0NAOH → Methyl-Y + Glycerol	0.058	0	25958.2
YXX	Methyl-Y + Glycerol → Y-- + MeOH	0.000	0	49822.92
YXX	YX- + MeOH + 0NAOH → Methyl-Y + 2-X-	0.053	0	72850.32
YXX	Methyl-Y + 2-X- → YX- + MeOH	0.002	0	67826.16
YXX	2-X- + MeOH + 0NAOH → Methyl-X + Glycerol	0.058	0	25958.2
YXX	Methyl-X + Glycerol → 2-X- + MeOH	0.000	0	49822.92
YXX	Y-X + MeOH + 0NAOH → Methyl-X + Y--	0.053	0	72850.32
YXX	Methyl-X + Y-- → Y-X + MeOH	0.002	0	67826.16
YXX	Y-X + MeOH + 0NAOH → Methyl-Y + X--	0.053	0	72850.32
YXX	Methyl-Y + X-- → Y-X + MeOH	0.002	0	67826.16
YXX	X-- + MeOH + 0NAOH → Methyl-X + Glycerol	0.058	0	25958.2
YXX	Methyl-X + Glycerol → X-- + MeOH	0.000	0	49822.92
YXX	XX- + MeOH + 0NAOH → Methyl-X + 2-X-	0.107	0	72850.32
YXX	Methyl-X + 2-X- → XX- + MeOH	0.002	0	67826.16
YXX	XX- + MeOH + 0NAOH → Methyl-X + X--	0.107	0	72850.32

YXX	Methyl-X + X-- → XX- + MeOH	0.002	0	67826.16
XYX	XYX + MeOH + 0NAOH → Methyl-X + XY-	0.008	0	56521.8
XYX	Methyl-X + XY- → XYX + MeOH	0.002	0	43124.04
		0.023110755 (LI) δ		
XYX	XYX + MeOH + 0NAOH → Methyl-Y + X-X	0.0077 (O)	0	56521.8
XYX	Methyl-Y + X-X → XYX + MeOH	0.002	0	43124.04
XYX	XY- + MeOH + 0NAOH → Methyl-Y + X--	0.053	0	72850.32
XYX	Methyl-Y + X-- → XY- + MeOH	0.002	0	67826.16
XYX	X-- + MeOH + 0NAOH → Methyl-X + Glycerol	0.058	0	25958.2
XYX	Methyl-X + Glycerol → X-- + MeOH	0.000	0	49822.92
XYX	XY- + MeOH + 0NAOH → Methyl-X + 2-Y-	0.053	0	72850.32
XYX	Methyl-X + 2-Y- → XY- + MeOH	0.002	0	67826.16
XYX	2-Y- + MeOH + 0NAOH → Methyl-Y + Glycerol	0.058	0	25958.2
XYX	Methyl-Y + Glycerol → 2-Y- + MeOH	0.000	0	49822.92
XYX	X-X + MeOH + 0NAOH → Methyl-X + X--	0.053	0	72850.32
XYX	Methyl-X + X-- → X-X + MeOH	0.002	0	67826.16

Anexo VI. Combustión de la fibra (aceite de palma)

La combustión de la fibra para obtener vapor de uso interno se llevó a cabo bajo las siguientes condiciones: combustión completa de la biomasa usando oxígeno al 50% de exceso; los gases de combustión generan vapor de alta presión (75 bar) (VAN NESS, 2007) y se liberan a la atmósfera a 180 °C. La composición asumida por el biocombustible, en este caso la torta de extracción, se encuentra en la Tabla 78.

Tabla 78 Análisis proximal de la torta de extracción (Husain, Zainac, & Abdullah, 2002)

Parámetro	Torta de extracción (%)
Materia volátil	72.8
Carbón fijo	18.8
Cenizas	8.4

Los datos que se encuentran en la Tabla 79 fueron utilizados para llevar a cabo la combustión de la materia prima

Tabla 79 Análisis ultanal de la torta de extracción (Husain et al., 2002)

Componente	Torta de extracción (%)
Hidrógeno	6
Carbón	47.2
Azufre	0.3
Nitrógeno	1.4
Oxígeno	36.7
Cenizas	8.4

En la Figura 34 se observa el diagrama de proceso utilizado para la combustión de la biomasa en el simulador Aspen Plus.

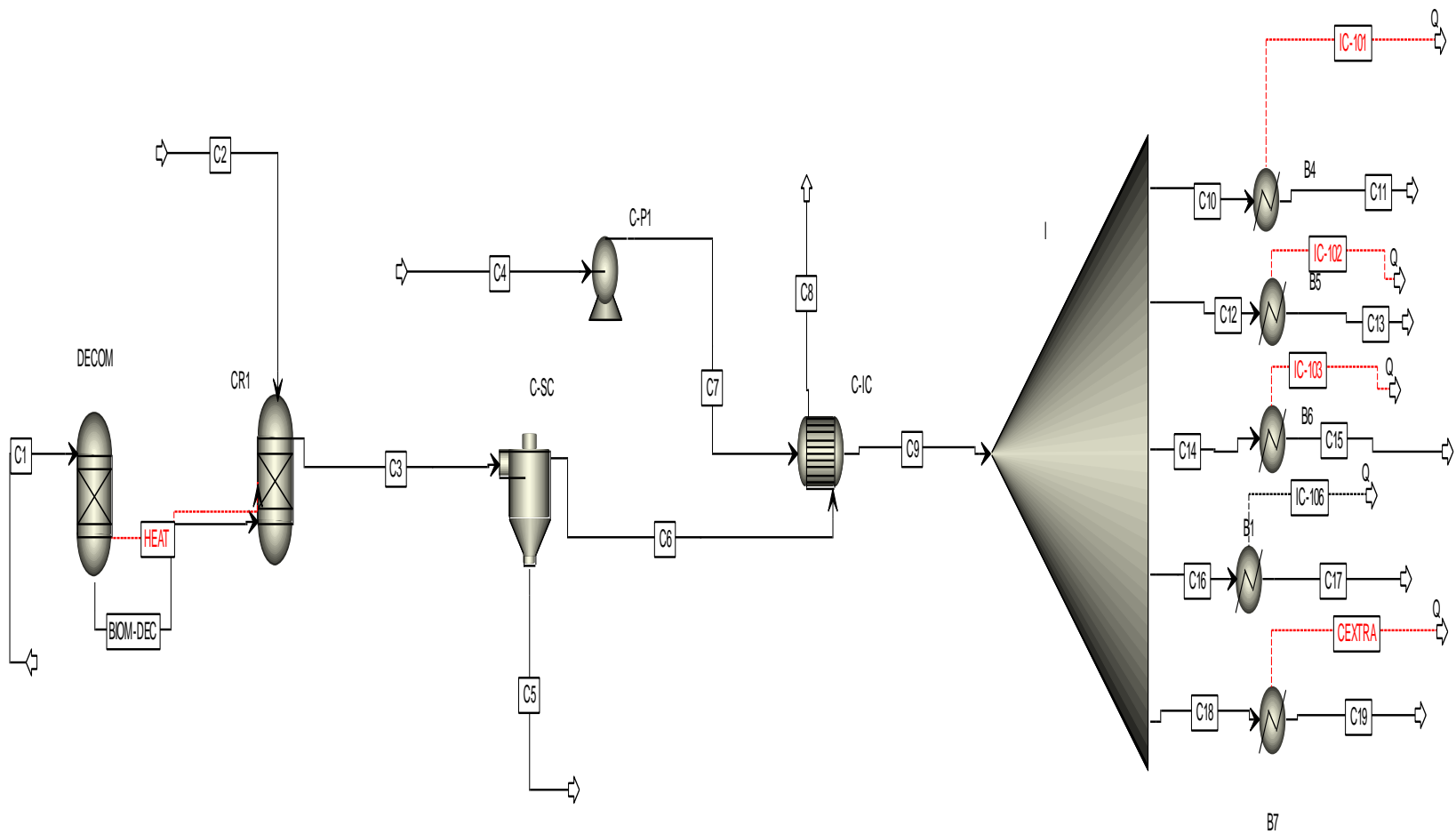


Figura 34 Proceso de combustión a partir de cáscaras y racimos de fruta frescas de palma

En la Tabla 80 se observan los equipos simulados en el proceso de combustión de las cáscaras y de los racimos de fruta fresca de la palma de aceite.

Tabla 80 Equipos utilizados en el diagrama de proceso para la combustión de cáscaras y racimos de fruta fresca

Equipo	Descripción
Descom	Reactor de combustión
CR1	Reactor de combustión
C-SC	Separador ciclónico
C-IC	Intercambiador de calor
C-P1	Bomba

Cabe mencionar que en la realidad es un solo reactor el que se utiliza. Para generar el calor necesario se sometió a las cáscaras y los racimos de fruta fresca de palma (C1) a un proceso de combustión con aire (C2), en una cámara de combustión (DECOM). Los residuos de cenizas y gases de chimenea que salen del reactor (C3), se envían a un separador ciclónico C-SC para retirar las cenizas (C5) (De Kam, Morey, & Tiffany, 2009).

Se basó en un calentamiento a presión constante en una caldera donde se hace pasar agua a alta presión (C-IC), donde el agua alimentada (C4) cambia de fase a vapor, dentro del condensador se produce líquido saturado y finalmente este líquido se bombea hasta la presión de la caldera (VAN NESS, 2007).

En la Tabla 81 se observan las consideraciones utilizadas para el proceso de combustión

Tabla 81 Consideraciones utilizadas en el simulador Aspen Plus para el proceso de combustión

Equipo	Datos de entrada	Bloque de simulación utilizado
R-DESCOM	Presión: 1 atm Temperatura: 25°C Este reactor se usó para descomponer la biomasa. Usando los datos de la Tabla 9 y 10.	Modelo termodinámico PR-BM (Peng-Robison and Boston-Mathias) RYield
CR1	Involucra los productos obtenidos de la Tabla 12.	Modelo termodinámico PR-BM (Peng-Robison and Boston-Mathias) RGibss
C-SC	Separa todas las cenizas de los gases obtenidos	Modelo termodinámico PR-BM (Peng-Robison and Boston-Mathias) SSPLIT
C-IC	Se fijó la temperatura de salida de los gases de combustión a 180 °C [20]	Modelo termodinámico PR-BM (Peng-Robison and Boston-Mathias) HeatX
C-P1	Presión de 75 bar [20]	Modelo termodinámico PR-BM (Peng-Robison and Boston-Mathias) HeatX

Anexo VII. Balance de materia y energía de biodiesel de ACU

En la Tabla 82 se muestra el balance de materia y energía en el proceso de ACU

Tabla 82 Balance de materia y energía a partir de ACU obtenido del simulador Aspen Plus

Total	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
Temperature C	25	25	25	25	25	55	25	25	25	30
Enthalpy										
MMBtu/hr	8192	245,76	7946,24	163,84	7782,4	7782,4	809,096	6973,302	69,733	697,33
Mass Flow kg/day	819,2	0	819,2	0	819,2	819,2	809,096	10,104	0	0
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	697,33
Metanol	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NAOH	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Glicerina	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Biodiesel	1120,666	0	1120,666	0	1120,666	1120,666	0	1120,665	0	0
Ac. Grasos	5842,534	0	5842,534	0	5842,534	5842,534	0	5842,533	0	0
Triglicéridos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Digliceridos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Monogliceridos	0	0	0	0	0	0	0	0	69,733	0
H ₂ SO ₄	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K ₂ SO ₄	409,6	245,76	163,84	163,84	0	0	0	0	0	0
Solidos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Total	F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18	F19	F20
Temperature C	23,8	55	40	40	25	90	90	90	25	25
Enthalpy MMBtu/hr	7740,365	7740,365	7268,897	471,466	85,658	557,131	110,854	446,277	1744,535	145,378
Mass Flow kg/day	10,104	28,206	2,969	25,237	0	48,157	0	48,157	0	0
Agua	697,33	665,133	283,858	381,275	0	381,275	0	381,275	1744,535	0
Metanol	0	0	0	0	0	0	0	0	0	145,378
NAOH	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Glicerina	0	295,899	295,726	0,173	0	0,173	0	0,173	0	0
Biodiesel	1120,665	838,86	836,471	2,39	0	2,39	0	2,39	0	0
Ac. Grasos	5842,533	5842,533	5842,533	0	0	0	0	0	0	0
Triglicéridos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Digliceridos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Monogliceridos	69,733	69,733	7,341	62,392	0	0	0	0	0	0
H ₂ SO ₄	0	0	0	0	0	110,854	110,854	0	0	0
K ₂ SO ₄	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Solidos	0	0	0	0	85,658	14,282	0	14,282	0	0

Total	F21	F22	F23	F24	F25	F26	F27	F28	F29	F30
Temperature C	27,2	55	55	55	55	85	85	85	85	30
Enthalpy MMBtu/hr	1889,913	1889,913	9158,81	7454,377	1704,43	388,693	634,265	7065,684	1070,169	1070,169
Mass Flow kg/day	0	0	2,969	0,318	2,652	0,291	1,505	0,026	1,147	1,147
Agua	1744,535	1744,535	1389,808	432,342	957,467	387,436	628,929	44,906	328,535	328,535
Metanol	145,378	145,378	145,378	15,555	129,823	0	0	15,555	129,824	129,824
NAOH	0	0	605,536	2,523	603,013	0,104	0,046	2,419	602,972	602,972
Glicerina	0	0	6115,157	6112,937	2,218	0,138	0,063	6112,798	2,154	2,154
Biodiesel	0	0	836,471	834,86	1,61	0,002	0,001	834,858	1,609	1,609
Ac. Grasos	0	0	16,353	16,353	0	0	0	16,353	0	0
Triglicéridos	0	0	5,236	5,236	0	0	0	5,236	0	0
Digliceridos	0	0	34,555	33,464	1,094	0	0	33,464	1,094	1,094
Monogliceridos	0	0	7,341	0,785	6,555	0,721	3,72	0,065	2,835	2,835
H ₂ SO ₄	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K ₂ SO ₄	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Solidos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Total	F31	F32	F33	F34	F35	F36	F37	F38
Temperature C	85	85	30	83,8	43,6	46	64,7	30
Enthalpy MMBtu/hr	26,146	7039,538	7039,538	1022,957	7268,897	1022,957	1022,957	1022,957
Mass Flow kg/day	0	0,026	0,026	1,796	2,969	1,796	1,796	1,796
Agua	12,125	32,781	32,781	1016,365	283,858	1016,365	1016,365	1016,365
Metanol	0	15,555	15,555	0	0	0	0	0
NAOH	1,524	0,895	0,895	0,15	0	0,15	0,15	0,15
Glicerina	0	6112,798	6112,798	0,202	295,726	0,202	0,202	0,202
Biodiesel	0	834,858	834,858	0,003	836,471	0,003	0,003	0,003
Ac. Grasos	3,27	13,086	13,086	0	5842,533	0	0	0
Triglicéridos	2,198	3,037	3,037	0	0	0	0	0
Digliceridos	7,027	26,436	26,436	0	0	0	0	0
Monogliceridos	0	0,065	0,065	4,441	7,341	4,441	4,441	4,441
H ₂ SO ₄	0	0	0	0	0	0	0	0
K ₂ SO ₄	0	0	0	0	0	0	0	0
Solidos	0	0	0	0	0	0	0	0

Anexo VIII. Balance de materia y energía de biodiesel de levaduras

En la Tabla 83 se muestra el balance de materia y energía en el proceso de producción de biodiesel a partir de levaduras, utilizando como sustrato glicerol.

Tabla 83 Balance de materia y energía a partir de levaduras obtenido del simulador Aspen Plus

Total	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
Temperature C	30	30	30,7	160	140	57	30	30	30	30
Enthalpy MMBtu/hr	-1,72	-121,39	-123,12	-5,21	-6,07	-122,25	-123,14	-0,10	-0,99	-123,36
Mass Flow kg/day	6000,00	194000,00	200000,00	10000,00	10000,00	200000,00	200000,00	11021,70	11457,14	199563,92
Agua	6,00	190059,92	190065,92	10000,00	10000,00	190065,92	190065,92	176,35	176,35	194920,34
Metanol	1842,00	0,00	1842,00	0,00	0,00	1842,00	1842,00	0,00	0,00	1842,00
NAOH	726,00	0,00	726,00	0,00	0,00	726,00	726,00	0,00	0,00	726,00
Glicerina	3378,00	0,00	3378,00	0,00	0,00	3378,00	3378,00	0,00	0,00	0,00
Biodiesel	24,00	0,00	24,00	0,00	0,00	24,00	24,00	0,00	0,00	24,00
Ac. Grasos libres	6,00	0,00	6,00	0,00	0,00	6,00	6,00	0,00	0,00	48,15
Monogliceridos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Digliceridos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Trigliceridos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1173,92
N2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8178,10	8178,10	0,00
O2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2512,95	416,78	0,00
CO2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,02	2542,64	0,00
Argon	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	143,28	143,28	0,00
H ₂ SO ₄	18,00	0,00	18,00	0,00	0,00	18,00	18,00	0,00	0,00	18,00

K ₂ SO ₄	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
(NH ₂) ₂ SO ₄	0,00	3938,08	3938,08	0,00	0,00	3938,08	3938,08	0,00	0,00	0,00
Levadura	0,00	2,00	2,00	0,00	0,00	2,00	2,00	0,00	0,00	811,52
KOH	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Total	F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18	F19	F20
Temperature C	65	65	65	30	25	30	32,9	60	71,6	71,6
Enthalpy MMBtu/hr	-122,21	-118,63	-3,58	-0,64	0,00	-0,07	-0,71	-0,70	-0,50	-0,19
Mass Flow kg/day	199563,92	191789,93	7773,99	2033,37	12,22	244,37	2289,96	2289,96	811,52	1478,44
Agua	194920,34	191021,93	3898,41	0,07	0,00	0,00	0,07	0,43	0,00	0,43
Metanol	1842,00	0,00	1842,00	0,04	0,00	244,37	244,41	243,76	0,00	243,76
NAOH	726,00	726,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Glicerina	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Biodiesel	24,00	24,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,93	0,00	5,93
Ac. Grasos libres	48,15	0,00	48,15	47,82	0,00	0,00	47,82	42,17	0,00	42,17
Monogliceridos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Digliceridos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Trigliceridos	1173,92	0,00	1173,92	1173,92	0,00	0,00	1173,92	1173,92	0,00	1173,92
N ₂	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
O ₂	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CO ₂	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Argon	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H ₂ SO ₄	18,00	18,00	0,00	0,00	12,22	0,00	12,22	12,22	0,00	12,22
K ₂ SO ₄	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

(NH ₂) ₂ SO ₄	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Levadura	811,52	0,00	811,52	811,52	0,00	0,00	811,52	811,52	811,52	0,00
KOH	65	65	65	30	25	30	32,9	60	71,6	71,6
<hr/>										
Total	F21	F22	F23	F24	F25	F26	F27	F28	F29	F30
Temperature C	40	40	25	90	90	90	25	25	27,2	60
Enthalpy MMBtu/hr	-0,14	-0,06	-0,01	-0,05	-0,05	0,00	-0,09	-0,01	-0,10	-0,10
Mass Flow kg/day	1269,70	208,74	28,52	237,26	216,48	20,77	304,73	25,39	330,12	330,12
Agua	0,02	0,41	0,00	4,71	4,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Metanol	50,44	193,33	0,00	193,33	193,33	0,00	304,73	0,00	304,73	304,73
NAOH	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	25,39	25,39	25,39
Glicerina	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Biodiesel	5,83	0,10	0,00	0,10	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ac. Grasos libres	38,97	3,20	0,00	3,20	3,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Monogliceridos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Digliceridos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Trigliceridos	1173,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
N ₂	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
O ₂	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CO ₂	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Argon	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H ₂ SO ₄	0,53	11,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K ₂ SO ₄	0,00	0,00	0,00	20,77	0,00	20,77	0,00	0,00	0,00	0,00
(NH ₂) ₂ SO ₄	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Levadura	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
KOH	0,00	0,00	1,00	0,06	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Total	F31	F32	F33	F34	F35	F36	F37	F38	F39	F40
Temperature C	60	60	60	120	170	120	170	30	120	120
Enthalpy MMBtu/hr	-0,23	-0,14	-0,09	-0,01	-0,04	-0,113	-0,039	-0,042	-0,001	-0,113
Mass Flow kg/day	1599,82	1289,16	310,67	58,64	165,14	1230,52	145,53	145,53	3,78	1226,74
Agua	0,02	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Metanol	226,54	61,20	165,34	58,18	159,60	3,02	5,75	5,75	0,82	2,20
NAOH	25,39	2,66	22,73	0,00	0,00	2,66	22,73	22,73	0,00	2,66
Glicerina	121,66	0,36	121,30	0,06	4,80	0,31	116,50	116,50	0,19	0,11
Biodiesel	1174,13	1173,73	0,39	0,34	0,27	1173,40	0,12	0,12	0,00	1173,40
Ac. Grasos libres	38,97	38,88	0,09	0,00	0,00	38,88	0,09	0,09	0,00	38,88
Monogliceridos	8,69	8,36	0,33	0,00	0,00	8,36	0,33	0,33	1,76	6,60
Digliceridos	1,08	1,08	0,00	0,00	0,00	1,08	0,00	0,00	0,45	0,62
Trigliceridos	2,82	2,82	0,00	0,00	0,00	2,82	0,00	0,00	0,57	2,26
N2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
O2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CO2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Argon	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2SO4	0,53	0,06	0,47	0,05	0,46	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00
K2SO4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
(NH2)2SO4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Levadura	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

KOH 0,00 0,00 0,00 0,00 0,00 0,00 0,00 0,00 0,00 0,00

Total	F41	F42	F43	F44	F45	F46
Temperature C	30	156,3	46	119,1	124,4	30
Enthalpy MMBtu/hr	-0,122	-0,054	-0,143	-0,054	-0,054	-0,065
Mass Flow kg/day	1226,74	223,78	1269,70	223,78	223,78	223,78
Agua	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Metanol	2,20	217,78	50,44	217,78	217,78	217,78
NAOH	2,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Glicerina	0,11	4,86	0,00	4,86	4,86	4,86
Biodiesel	1173,40	0,61	5,83	0,61	0,61	0,61
Ac. Grasos libres	38,88	0,00	38,97	0,00	0,00	0,00
Monogliceridos	6,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Digliceridos	0,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Trigliceridos	2,26	0,00	1173,92	0,00	0,00	0,00
N2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
O2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CO2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Argon	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H ₂ SO ₄	0,00	0,51	0,53	0,51	0,51	0,51
K ₂ SO ₄	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
(NH ₂) ₂ SO ₄	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Levadura	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
KOH	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Anexo IX. Módulos del SimaPro (aceite de palma)

En la Tabla 84 se observan los módulos utilizados en el SimaPro para producir biodiesel a partir de aceite de palma.

Tabla 84 Módulos utilizados en el SimaPro 8.4 para biodiesel a partir de aceite de palma

Parámetro	Etapa	Modulo en Simapro
Urea	Agronómica	Urea, as N {GLO} market for Alloc Def, U
Triple 17	Agronómica	Phosphate fertiliser, as P2O5 {RER} basic slag fertiliser production Alloc Def,U - Nitrogen fertiliser, as N {GLO} field application of ammonium chloride Alloc Def, U - Potassium fertiliser, as K2O {GLO} field application of compost Alloc Def, U
Cloruro de potasio	Agronómica	Potassium fertiliser, as K2O {GLO} field application of compost Alloc Def, U
NPK	Agronómica	Potassium fertiliser, as K2O {GLO} field application of compost Alloc Def, U
Diesel	Agronómica	Transport, tractor and trailer, agricultural {RoW} processing Alloc Def, U palma
Paraquat	Agronómica	Bipyridylum-compound {GLO} market for Alloc Def, U
Gramoxone	Agronómica	Bipyridylum-compound {GLO} market for Alloc Def, U
Karmex	Agronómica	Glyphosate {GLO} market for Alloc Def, U
Glifosato	Agronómica	Glyphosate {GLO} market for Alloc Def, U
Velfosato	Agronómica	Glyphosate {GLO} market for Alloc Def, U
Faena	Agronómica	Glyphosate {GLO} market for Alloc Def, U
Graminicida	Agronómica	Glyphosate {GLO} market for Alloc Def, U
Cupoquat	Agronómica	Bipyridylum-compound {GLO} market for Alloc Def, U
Cerillo	Agronómica	Bipyridylum-compound {GLO} market for Alloc Def, U
Foley	Agronómica	Pesticide, unspecified {GLO} market for Alloc Def, U
Arrivo	Agronómica	Pesticide, unspecified {GLO} market for Alloc Def, U
Folidol	Agronómica	Organophosphorus-compound, unspecified {GLO} market for Alloc Def, U
Siroco	Agronómica	Pesticide, unspecified {GLO} market for Alloc Def, U
Parathion	Agronómica	Organophosphorus-compound, unspecified {GLO} market for Alloc Def, U
Captan	Agronómica	Captan {GLO} market for Alloc Def, U
Malathion	Agronómica	Organophosphorus-compound, unspecified {GLO} market for Alloc Def, U
Agrimicin	Agronómica	Pesticide, unspecified {GLO} market for Alloc Def, U
Thiram	Agronómica	Pesticide, unspecified {GLO} market for Alloc Def, U
venomil	Agronómica	Pesticide, unspecified {GLO} market for Alloc Def, U
Rodenticida	Agronómica	Pesticide, unspecified {GLO} market for Alloc Def, U
Diésel	Transporte	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW} transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Alloc Def, U
Metanol	Industrial	Methanol {GLO} market for Alloc Def, U
KOH	Industrial	Potassium hydroxide {GLO} market for Alloc Def, U
NaOH	Industrial	Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {GLO} market for Alloc Def, U
Ácido sulfúrico	Industrial	Sulfuric acid {GLO} market for Alloc Def, U
Electricidad	Industrial	Electricity, medium voltage {MX} market for Alloc Def, U

Agua	Industrial	Water, well, in ground, MX
Cenizas	Gestión de residuos	Wood ash mixture, pure (waste treatment) {CH} treatment of, sanitary landfill Alloc Def, U
Diesel	Distribución y uso	Diesel, burnt in freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW} Alloc Def, U

Anexo X. Modelo de emisiones por uso de fertilizante

De acuerdo con el modelo de la ART (Nemecek & Schnetzer, 2011), las emisiones de metales pesados y fósforo por concepto de uso de fertilizantes no depende del tipo de suelo, sino del tipo de fertilizante. Del análisis de inventario de ciclo de vida que se observa en la, se requieren, para cada megajoule de biodiesel: 6.11×10^{-4} kg de urea (46-00-00), 2.89×10^{-3} kg de fosfato triple 17 (17-17-17), 5.32×10^{-4} kg de cloruro de potasio y 1.3×10^{-4} kg de NPK (14-14-14). El contenido de metales pesados de todos estos fertilizantes se puede consultar en la base de datos del Departamento de Agricultura del Estado de Washington, con excepción de fosfato triple 17. Para modelar este último se utilizó el contenido de metales del fertilizante Triple superfosfato (16-16-16) como se observa en la Tabla 85.

Tabla 85. Contenido de metales pesados de ciertos fertilizantes minerales

Fertilizante	Código WSDA	Contenido de metales pesados (ppm)					
		Cd	Cu	Zn	Pb	Ni	Cr
Urea (46-00-00)	2843-0006	5		12.5	17.5	7.5	
Triple superfosfato (16-16-16)	1921-0027	42.9		497	5.2	89.7	
NPK (14-14-14)	2230-0102	0.04		40.6	0.8	0.25	
Cloruro de potasio	[19]	0.1	8.33	7.667	9.17	3.5	3.33

Las emisiones de fósforo se estiman basando en el contenido de fósforo de cada fertilizante utilizando el siguiente modelo (Nemecek & Schnetzer, 2011):

$$P_{gw} = P_{gwl} \times \left(1 + \frac{0.2}{80} \times Q_{P_{2O_5}} \right)$$

Siendo P_{gw} el fósforo emitido al agua subterránea, P_{gwl} la cantidad promedio de fósforo emitido al agua subterránea (0.07 kg/ha/a para tierras de cultivo) y $Q_{P_{2O_5}}$ la dosis de fósforo (como P_2O_5) añadido al suelo.

Las emisiones de gases nitrogenados al aire dependen del tipo y cantidad de fertilizantes nitrogenados aplicados, el tipo de cultivo, el área de cultivo y de las siguientes condiciones geoclimáticas: (1) precipitación anual, (2) tipo de suelo (orden USDA), (3) la región climática y (4) la actividad arcillosa del suelo. Por su parte, las emisiones de nitrato al agua dependen de las mismas condiciones con excepción del tipo de fertilizante (RSB, 2016). Para usar este modelo se utilizaron los siguientes datos de entrada: el tipo de suelo es de arcilla de alta actividad (HAC), y la región climática predominante en México es tropical húmedo. Del análisis de inventario se conoce que se requieren 7.15×10^{-7} ha para producir 1 MJ de biodiesel.

La precipitación por estado se reporta en la Tabla 86.

Tabla 86. Precipitación media por estado (INEGI)

	Chiapas	Campeche	Veracruz	Tabasco
Precipitación	2000	1600	1500	2250

La Tabla 87 muestra las emisiones de gases nitrogenados al aire y de nitrato al agua por concepto de aplicación de urea, fosfato diamónico y biofertilizante (1.31% de nitrógeno). Ya que la cantidad de nitrógeno aplicado es la misma, las emisiones de nitrato al agua serán las mismas para todos los fertilizantes (RSB, 2016).

Tabla 87. Otras emisiones generadas por la aplicación de fertilizantes por 1 MJ de biodiesel.

Emisión	Unidad	Uso de urea	Uso de fosfato triple 17	Cloruro de potasio	NPK
N ₂ O al aire	kg·MJ ⁻¹	5.92E-06	3.68E-02	0.00E+00	5.59E-07
NO _x al aire	kg·MJ ⁻¹	1.24E-06	7.74E-03	0.00E+00	1.17E-07
NH ₃ al aire	kg·MJ ⁻¹	5.12E-05	9.64E-02	0.00E+00	8.84E-07
CO ₂ al aire	kg·MJ ⁻¹	4.41E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Nitrato al agua	kg·MJ ⁻¹	3.17E-04	1.65E+00	0.00E+00	9.84E-05

Anexo XI. Modelo de emisiones aguas residuales y tiraderos a cielo abierto

En este anexo se describe el procedimiento que se utilizó para estimar las emisiones de vertederos abiertos de los racimos de fruta fresca y torta de extracción, así como del tratamiento de aguas residuales en lagunas facultativas provenientes de la etapa de esterilización y clarificado.

En las lagunas facultativas, se consideró que todos los metales pesados son emisiones al agua (Stichnothe & Schuchardt, 2010). Las emisiones al aire se obtuvieron siguiendo la metodología propuesta por el IPCC, capítulo cuatro, “*Wastewater treatment and discharge*”, considerando que la cantidad de dióxido de carbono emitida es igual a la de metano en términos molares (IPCC, 2006b). Las emisiones de N₂O se tomaron de bibliografía. En la Tabla 88 se resumen los datos utilizados para calcular las emisiones al aire, suelo y agua. En el caso de las aguas residuales, únicamente se consideraron las emisiones al aire y al agua (Stichnothe & Schuchardt, 2010).

Tabla 88. Caracterización de los residuos obtenidos. Cantidades en kilogramos por tonelada de racimo de fruta fresca (Stichnothe & Schuchardt, 2010).

Componente	Racimos de fruta vacía	Aguas residuales
Carbón	3.85E+01	2.24E+01
Nitrógeno	7.13E-01	1.11E+00
Fósforo	8.64E-02	2.66E-01
Potasio	2.14E+00	3.36E+00
Calcio	1.60E-01	4.31E-01
Magnesio	1.60E-01	9.17E-01
Plomo	1.60E-04	4.31E-04
Cadmio	2.67E-05	1.82E-05
Cromo	4.44E-03	3.27E-03
Cobre	1.25E-03	1.86E-03
Níquel	2.72E-03	8.13E-05
Mercurio	4.45E-05	3.03E-05
Zinc	3.38E-03	4.86E-03

En el caso de los vertederos abiertos (racimos de fruta vacía y torta de extracción residual) se estimaron las emisiones al aire con la metodología del IPCC para residuos sólidos (capítulo 4) (IPCC, 2006b), mientras que las emisiones al agua y al suelo se estimaron a partir de los datos obtenidos en la Tabla 88 con la metodología de la ART para metales pesados (Nemecek & Schnetzer, 2011). Los cálculos se realizaron para cada estado según las productividades calculadas en el Anexo I.

En la Tabla 89 se observan los resultados obtenidos.

Tabla 89 Resultados obtenidos de biodiesel, residuos sólidos y aguas residuales a partir de palma

Parámetro	Unidad	Chiapas	Campeche	Tabasco	Veracruz
Productividad de palma	t/ha/a	15.01	7.41	9.73	8.33
Superficie cosechada	ha	8943	11783	10740	58652
Racimos de fruta frescos	MJ/ha/a	1.38E+05	8.95E+04	1.07E+05	5.01E+05
Biodiesel producido	MJ/ha/a	9.45E+08	6.14E+08	7.35E+08	3.44E+09
Racimos de fruta vacíos y torta de extracción residual	kg/ha/a	4.69E+07	3.05E+07	4.01E+07	1.71E+08
Aguas residuales	t/ha/a	1.22E+08	7.95E+07	9.51E+07	4.45E+08

Los resultados de la estimación de emisiones de metales pesados hacia el suelo y agua se muestran en la Tabla 90.

Tabla 90. Emisiones al agua y al suelo en vertederos abiertos de racimos de fruta vacíos y torta de extracción residual

Emisiones	Unidad	Cd	Cu	Zn	Pb	Ni	Cr
Agua	kg/ha	3.69E-09	3.56E-06	2.38E-06	9.94E-09	0.00E+00	4.82E-05
Suelo	kg/ha	4.80E-08	00E-00	4.15E-06	3.00E-07	5.25E-06	00E00

Anexo XII. Módulos del SimaPro (ACU)

En la Tabla 91 se observan los módulos utilizados en el SimaPro para producir biodiesel a partir de ACU.

Tabla 91 Módulos utilizados en el SimaPro 8.4 para biodiesel a partir de ACU

Parámetro	Módulo de Simapro 8.4
Insumos	
<i>Etapa de transporte</i>	
Diésel	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RER} transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 Alloc Def, U
Gasolina	Transport, combination truck, gasoline powered/US
<i>Etapa industrial</i>	
Metanol	Methanol {GLO} market for Alloc Def, U
Jabón	Soap {GLO} market for Alloc Def, U
KOH	Potassium hydroxide {GLO} market for Alloc Def, U
NaOH	Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {GLO} market for Alloc Def, U
Ácido sulfúrico	Sulfuric acid {GLO} market for Alloc Def, U
Electricidad	Electricity, medium voltage {MX} market for Alloc Def, U
Agua	Water, well, in ground, MX
Carbón activado	Activated carbon, at plant/RER Economic
Agua de enfriamiento	Water, well, in ground, MX
<i>Etapa de gestión de residuos</i>	
Sólidos	Municipal solid waste {RoW} treatment of, sanitary landfill Alloc Def, U
<i>Etapa de distribución</i>	
Diésel	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW} transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Alloc Def, U
Sistema alternativo	
Diésel	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RoW} transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 Alloc Def, U Simapro v8.4.
Sulfato de potasio	Potassium sulfate, as K2O {RoW} potassium sulfate production Alloc Def, U

Anexo XIII. Módulos del SimaPro (levaduras)

En la Tabla 92 se observan los módulos utilizados en el SimaPro para producir biodiesel a partir de aceite de levaduras.

Tabla 92 Módulos utilizados en el SimaPro 8.4 para biodiesel a partir de levaduras

Parámetro	Módulo de Simapro 8.4
Insumos	
<i>Etapa de transporte</i>	
Diésel	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RER} transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 Alloc Def, U
Gasolina	Transport, combination truck, gasoline powered/US
<i>Etapa industrial</i>	
Metanol	Methanol {GLO} market for Alloc Def, U
Jabón	Soap {GLO} market for Alloc Def, U
KOH	Potassium hydroxide {GLO} market for Alloc Def, U
NaOH	Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {GLO} market for Alloc Def, U
Ácido sulfúrico	Sulfuric acid {GLO} market for Alloc Def, U
Electricidad	Electricity, medium voltage {MX} market for Alloc Def, U
Sulfato de amonio	Ammonium sulfate, as N {GLO} market for Alloc Def, U
Agua	Water, well, in ground, MX
Carbón activado	Activated carbon, at plant/RER Economic
Agua de enfriamiento	Water, well, in ground, MX
<i>Etapa de gestión de residuos</i>	
Aguas residuales	Sewage sludge {RoW} treatment of by anaerobic digestion Alloc Rec, U
<i>Etapa de distribución</i>	
Diésel	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW} transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Alloc Def, U
Sistema alternativo	
Diésel	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RoW} transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 Alloc Def, U Simapro v8.4.
Sulfato de potasio	Potassium sulfate, as K2O {RoW} potassium sulfate production Alloc Def, U

